



Escola Politècnica Superior  
d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# TREBALL FINAL DE GRAU

**TÍTOL:** Disseny d'un motor elèctric per a e-bikes sostenibles

**AUTOR:** Eduard Mirabet Cantó

**TITULACIÓ:** Grau en Enginyeria Elèctrica

**DIRECTOR:** Blanqué Molina, Balduí

**DEPARTAMENT:** Enginyeria Elèctrica

**DATA:** 27/05/2015

**TÍTOL: Disseny d'un motor elèctric per a e-bikes sostenibles**

**COGNOMS:** Mirabet Cantó

**NOM:** Eduard

**TITULACIÓ:** Grau en Enginyeria Elèctrica

**PLA:** Grau

**DIRECTOR:** Blanqué Molina, Balduí

**DEPARTAMENT:** Enginyeria Elèctrica (709)

**QUALIFICACIÓ DEL PFC**

**TRIBUNAL**

**PRESIDENT**

**SECRETARI**

**VOCAL**

**Ramon Caumons Sangra**

**Eusebio Martínez Piera**

**Emilia Papiol Viera**

**DATA DE LECTURA: 27/07/2014**

Aquest Projecte té en compte aspectes mediambientals: ☒ Sí ☐ No

## TREBALL FINAL DE GRAU

### RESUM (màxim 50 línies)

El present projecte tracta sobre el desenvolupament de millores en un motor híbrid de reluctància (HRM) per a implementar-lo en una bicicleta elèctrica. Es vol que aquest motor pugui aprofitar els seus avantatges en quant a regeneració d'energia i pugui recarregar les bateries del sistema.

Aquest projecte situa el context actual de la bicicleta elèctrica i les limitacions que n'estableix la normativa que se li aplica. També pretén veure quines necessitats té el mercat i realitzar una acció de millora al motor que pugui ser beneficiosa per a l'usuari.

Així doncs, es dissenyen diferents models de motor HRM i s'estudien aplicant la tècnica del '*design thinking*'. S'apliquen millores en els dissenys de motors fins a trobar un que dona resultats que poden ser positius per a l'objectiu que es persegueix.

Posteriorment s'ha desenvolupat un sistema de simulació del control i el funcionament del motor per a poder simular el seu comportament i veure si els resultats obtinguts són els esperats. Amb aquests assajos s'ha pogut comprovar com afecten diferents modificacions d'alguns dels paràmetres físics dels motors i també que el motor és capaç de retornar energia.

A continuació es fa un estudi de viabilitat del motor dissenyat fent la comparativa amb un motor de disseny similar i sobre el que dóna millors resultats.

Finalment s'extreuen diferents conclusions sobre el projecte i es proposen diferents futures vies de treball per a seguir amb la seva millora i potenciar-ne el seu ús.

### Paraules clau (màxim 10):

Bicicleta	Disseny	Motor	Generador
Elèctrica	HRM	Simulació	Innovació
Normativa	Bateria		

## FINAL GRADE PROJECT

### ABSTRACT (50 lines maximum)

This project is about the development of the improvement of a hybrid reluctance motor (HRM) in order to use it in an electric bicycle. We would like to take the most of this engine about energy regeneration, being able to recharge itself the system batteries.

This project explains the current context of the electrical bicycles and the limitations of the applied regulation. It also aims to see what the market needs and improve some aspects of the engine in order to be beneficial to the user.

Different HRM engines are designed and studied applying the technique of 'design thinking'. We apply improvements to the engines in order to find one that could give us positive results to the intended objective.

Afterwards we have developed a simulation system of the control and operation of the motor to simulate its performance and check if results achieved are the expected. By this essays we could test how affect different modifications of some of the physical parameters of the engine and also check if it the motor is able to return energy.

The following is a feasibility study of the engine by comparing to a motor with a similar design which gives best results.

Finally different conclusions are drawn about the project and there are some proposals of future work orientations to continue with the improvements of the engine and also to promote its use.

### Keywords (10 maximum):

Bicycle	Design	Motor	Generator
Electric	HRM	Simulation	Innovation
Regulation	Battery		

## AGRAÏMENTS

La presentació d'aquest projecte ha estat possible gràcies a múltiples aportacions. En especial vull agrair el seu suport i ajuda a:

Balduí Blanqué, director del projecte, pels seus consells i dedicació, sense la seva empena i entusiasme no hagués estat possible.

Als companys i amics Jennifer Hermoso, Oriol Malonda, Kiko Torres i Carles Ultraran, per tot el temps que hem passat junts treballant, per la seva dedicació i la seva paciència.

Als companys de grup de treball *agile* amb qui tantes hores de laboratori s'ha compartit i tants somriures ens hem tret.

Als meus amics i familiars, per estar sempre allà, per creure en mi i per haver compartit tants bons moments junts també necessaris per a tirar endavant el projecte.

# SUMARI

<b>1. INTRODUCCIÓ.....</b>	<b>11</b>
1.1. JUSTIFICACIÓ .....	11
1.2. OBJECTIUS.....	12
1.3. MOTIVACIONS .....	13
1.4. ESTRUCTURA DEL TREBALL.....	13
1.5. METODOLOGIA DE TREBALL.....	14
1.6. PRECEDENTS I PARTICIPACIÓ .....	16
1.7. CONSIDERACIONS MEDIAMBIENTALS.....	17
<b>2. ESTAT ACTUAL DE LA BICICLETA ELÈCTRICA .....</b>	<b>18</b>
2.1. TENDÈNCIES ACTUALS.....	18
2.2. CANVI DE NORMATIVA I LA SEVA PROBLEMÀTICA .....	26
2.2.1. <i>Definició de les oportunitats de mercat</i> .....	27
2.3. IDENTIFICACIÓ D'USUARIS .....	27
2.3.1. <i>Necessitats de l'usuari</i> .....	28
2.4. BRIEFING .....	29
<b>3. FUNCIONAMENT DE LA BICICLETA ELÈCTRICA.....</b>	<b>31</b>
3.1. FUNCIONAMENT BÀSIC .....	31
3.1.1. <i>Pedaleig</i> .....	31
3.1.2. <i>Transmissió del moviment</i> .....	32
3.1.3. <i>Força, parell i potència del pedaleig</i> .....	33
3.1.4. <i>Forces que actuen contra el moviment del ciclista</i> .....	33
3.1.5. <i>Força total del sistema</i> .....	34

3.2.	COMPONENTS PRINCIPALS .....	34
3.2.1.	<i>Motor</i> .....	34
3.2.2.	<i>Convertidor de potència</i> .....	35
3.2.3.	<i>Sensors</i> .....	35
3.2.4.	<i>Bateria</i> .....	35
3.2.5.	<i>Reductora</i> .....	37
<b>4.</b>	<b>MOTOR PER A LA BICICLETA ELÈCTRICA:.....</b>	<b>38</b>
4.1.	ESTAT DE L'ART DELS MOTORS ELÈCTRICS PER A E-BIKES .....	38
4.1.1.	<i>Motor d'inducció (IMD)</i> .....	38
4.1.2.	<i>Motor Brushless</i> .....	38
4.1.3.	<i>Motor síncron amb imants (SPMMD)</i> .....	39
4.1.4.	<i>Motor de reluctància autocommutada (SRM)</i> .....	39
4.1.5.	<i>Justificació del Motor Híbrid de Reluctància (HRM)</i> .....	40
4.2.	PLEC DE CONDICIONS .....	41
4.3.	PARÀMETRES DE DISSENY DEL MOTOR HRM .....	42
4.3.1.	<i>Nombre de pols de l'estator i del rotor</i> .....	43
4.3.2.	<i>Diàmetre exterior de l'estator i del rotor</i> .....	43
4.3.3.	<i>Distància de l'entreferro</i> .....	44
4.3.4.	<i>Distància angular entre els pols de l'estator i els pols del rotor</i> .....	44
4.3.5.	<i>Bobinatge de l'estator</i> .....	44
4.3.6.	<i>Aïllant exterior</i> .....	45
4.3.7.	<i>Nombre d'imans permanents</i> .....	45
<b>5.</b>	<b>CONTROL DEL CONVERTIDOR PER AL MOTOR: .....</b>	<b>46</b>

5.1.	ESTRATÈGIES DE CONTROL .....	46
5.1.1.	<i>Puls únic</i> .....	46
5.1.2.	<i>PWN (Pulse With Modulation) control de tensió</i> .....	46
5.1.3.	<i>Histèresi (control de corrent)</i> .....	46
5.2.	ESTRATÈGIES DE COMMUTACIÓ.....	47
5.2.1.	<i>SoftChopping</i> .....	47
5.2.2.	<i>HardChopping</i> .....	47
<b>6.</b>	<b>PROCÉS D'ANÀLISI DEL MOTOR I MILLORES APLICADES A L'HRM.....</b>	<b>48</b>
6.1.	ANÀLISI DELS MODELS DE PARTIDA .....	49
6.2.	ANÀLISI DE LES PRIMERES VARIANTS.....	55
6.3.	ANÀLISI DE LES SEGONES VARIANTS.....	62
6.4.	VARIACIÓ DE LA PROFUNDITAT DEL MOTOR.....	72
6.5.	CONCLUSIONS DELS ASSAJOS I LES VARIACIONS DEL DISSENY.....	76
<b>7.</b>	<b>SIMULACIÓ DEL SISTEMA DE REGULACIÓ I CONTROL DEL CONVERTIDOR I DEL MOTOR .....</b>	<b>78</b>
7.1.	GENERACIÓ LÒGICA D'ANGLES DE DISPAR .....	78
7.2.	CONTROL DE PARELL DEL MOTOR I LÒGICA DE CORRENT .....	80
7.3.	CONTROL LÒGICA DISPAR DELS INTERRUPTORS DEL CONVERTIDOR .....	82
7.4.	ESQUEMA GENERAL DEL SISTEMA DE SIMULACIÓ .....	84
<b>8.</b>	<b>ASSAJOS DINÀMICS DE VALIDACIÓ: .....</b>	<b>85</b>
8.1.	ASSAIG EN MODE MOTOR .....	85
8.2.	ESTUDI DE LA CORBA PARELL VELOCITAT I AUGMENT DE LA PROFUNDITAT DEL MOTOR.....	86
8.3.	FORMES D'ONA DEL MOTOR.....	91



8.4.	MOTOR EN MODE GENERADOR.....	94
8.4.1.	<i>Corbes de parell velocitat en mode generador .....</i>	<i>95</i>
8.4.2.	<i>Corbes de corrent velocitat en mode generador.....</i>	<i>96</i>
8.4.3.	<i>Corbes de rendiment en mode generador.....</i>	<i>96</i>
8.4.4.	<i>Conclusions de l'assaig.....</i>	<i>97</i>
8.4.5.	<i>Augment de la profunditat del generador .....</i>	<i>98</i>
8.5.	FORMES D'ONA DEL GENERADOR .....	102
<b>9.</b>	<b>ESTUDI SOBRE LA REDUCCIÓ DE LES DIMENSIONS DEL MOTOR .....</b>	<b>105</b>
9.1.	ANÀLISI ESTÀTIC DEL NOU DISSENY DE MOTOR.....	105
<b>10.</b>	<b>VIABILITAT DEL MOTOR DISSENYAT .....</b>	<b>109</b>
10.1.	ASSAIG EN MODE MOTOR .....	109
10.2.	ASSAIG EN MODE GENERADOR.....	111
10.3.	CONCLUSIONS SOBRE LA VIABILITAT DEL MOTOR .....	115
<b>11.</b>	<b>CONCLUSIONS .....</b>	<b>117</b>
<b>12.</b>	<b>FUTURES LÍNIES DE TREBALL .....</b>	<b>119</b>
<b>13.</b>	<b>PRESSUPOST .....</b>	<b>121</b>
<b>14.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>123</b>
	BIBLIOGRAFIA: .....	123
	WEBGRAFIA: .....	123
<b>15.</b>	<b>LLISTAT D'ABREVIATURES I SÍMBOLS.....</b>	<b>125</b>
<b>16.</b>	<b>ÍNDIX D'IL·LUSTRACIONS, TAULES I GRÀFIQUES.....</b>	<b>126</b>
16.1.	ÍNDIX D'IL·LUSTRACIONS .....	126
16.2.	ÍNDIX DE TAULES.....	128

16.3.	ÍNDIX DE GRÀFIQUES .....	129
<b>17.</b>	<b>PLÀNOLS DE LA PROPOSTA DE MOTOR DEFINITIVA .....</b>	<b>133</b>
17.1.	CONJUNT MOTOR HRM PER A RODA DE 26'' .....	133
17.2.	MOTOR HRM PER A RODA DE 26'' .....	133
17.3.	ESTATOR DE L'HRM PER A RODA DE 26'' .....	133
17.4.	ROTOR DE L'HRM PER A RODA DE 26'' .....	133
 <b>ANNEX A. NORMATIVA: UNE-EN 15194:2009+A1:2012; CICLES. CICLES AMB</b>		
	<b>ASSISTÈNCIA ELÈCTRICA. BICICLETES EPAC. ....</b>	<b>139</b>
 <b>ANNEX B. PROCEDIMENT DE REALITZACIÓ DE LA SIMULACIÓ DE L'ASSAIG DINÀMIC</b>		
	<b>DEL MOTOR.....</b>	<b>141</b>

## 1. Introducció

### 1.1. Justificació

La bicicleta és un mitjà de transport que mai no passarà de moda. Un invent que té més de 100 anys i que sembla que no pari de renéixer. El plaer de passejar amb bicicleta, l'estalvi energètic, l'esperit esportista, l'aventura, són només algunes de les sensacions que proporciona.

Avui dia, la bicicleta és un mitjà que crea tendència, torna a estar a l'avantguarda de la societat, al progrés, lligada a l'estalvi energètic. Moltes ciutats ho veuen en el seu dia a dia: cada cop més gent opta per aquest mitjà de transport per les seves facilitats, per la seva senzillesa i pel seu baix cost, tant econòmic com ambiental.

Aquest auge ha fet que grans marques automobilístiques, paral·lelament amb altres fabricants de bicicletes hagin invertit grans quantitats en investigació i desenvolupament per tal d'arribar a un producte que s'acosti cada cop més a les necessitats de l'usuari i facin més agradable el seu ús i faciliti encara més la seva utilització.

Ajuntaments i consorcis de grans ciutats, ja han començat a desenvolupar plans i a teixir grans àrees i carrils per a que les bicicletes facilitin cada cop més la seva tasca i no es creïn problemes de transit tot segregant els carrils. Eines com el 'Bicing' o el 'Bike Box' també han sigut impulsades pels ajuntaments per a proporcionar facilitats en aquest mitjà de transport, i cada cop són més les iniciatives que es duen a terme.

Així doncs, aquest projecte s'ha volgut afegir en aquest camp d'investigació i ha volgut desenvolupar una eina que permeti millorar la qualitat ambiental a les ciutats i que serveixi per a crear tendència en quant a una nova tipologia de motors per tal de facilitar la vida a l'usuari i al producte final al qual aquest traurà segur més profit.

Amb el projecte actual el que és vol és estudiar diferents estructures possibles de motor i fer balanç de les millores que introdueixin en aquestes. En acabar, es decidirà i justificarà una d'elles tot fent el possible per millorar-la i treure'n el màxim profit.

## 1.2. Objectius

En el marc d'aconseguir una millora per a la societat actual en l'àmbit de l'enginyeria i aportant una proposta sostenible i realista, aquest projecte té com a objectiu principal realitzar un estudi exhaustiu de les possibilitats d'èxit de funcionament que pot tenir un motor HRM aplicat en una bicicleta elèctrica. Aquest motor es vol que treballi tant en mode motor com en mode generador, per tal d'aprofitar l'energia sobrant del ciclista i de la bicicleta en determinades circumstàncies. Així doncs, es vol estudiar, avaluar i comparar el diferent comportament del motor en funció dels seus possibles dissenys, per tal d'esbrinar quin és el més òptim per a acomplir amb els requisits establerts.

Per a fer-ho s'ha partit des del coneixement de diversos aspectes, ja que s'havia participat de forma activa en el projecte anterior que estudiava la viabilitat de l'ús d'aquest tipus de motors en bicicletes elèctriques i la seva possibilitat de generar energia.

A partir d'aquí es volen repassar conceptes, com ara les tendències del mercat pel que fa a les bicicletes elèctriques i les novetats més destacades. També detectar la problemàtica pel que fa a la recàrrega i al ràpid esgotament de les bateries de les bicicletes.

Un altre objectiu és conèixer els tipus de motors més indicats per aquest tipus de vehicles i veure perquè el motor MHR és el més indicat per al fi que s'ha establert.

Per altre banda es vol explicar també quin és el funcionament de la bicicleta elèctrica, i el perquè de cada un dels seus components. Es posarà el focus en el motor, en quin són els seus paràmetres essencials i com es desenvolupa el seu disseny.

Tot seguit l'objectiu és desenvolupar un motor que proporcioni el màxim parell possible i que sigui vàlid per a la regeneració d'energia, és a dir, que pugui funcionar com a generador i potenciar l'estalvi energètic.

Per tal d'assegurar el correcte funcionament del motor dissenyat es procedirà a assajar-lo i a comprovar els resultats obtinguts. Es vol aplicar millores si és necessari, i establir en quins rangs el motor funciona de forma òptima.

El darrer objectiu del treball serà treure conclusions de tota la feina que s'ha fet, veure si els resultats són els que s'havia esperat i proposar noves línies de treball per a poder desenvolupar aquest producte en cas que fos útil i funcionés correctament.

### 1.3. Motivacions

Durant la realització d'aquest projecte són diverses les motivacions que han acompanyat les diferents tasques i han ajudat a tirar-lo endavant.

Per una banda el fet de realitzar el Treball Final de Grau, ja és una motivació en si mateix, ja que és la darrera aportació que es fa durant els anys dedicats a l'estudi del grau universitari, i serveix per a posar en valor la feina d'estudi i comprensió feta durant aquest temps.

També posar en valor el fet que es tracta d'un treball de caire multidisciplinar tot i que s'ha enfocat molt en la basant elèctrica del projecte.

La metodologia de treball ha estat un punt clau ja que l'ús de les metodologies de treballs àgils, com és el cas de l'*Scrum* ha permès fer un seguiment acurat de les tasques realitzades, els objectius que es prioritzen i el focus que té el treball per tal d'avançar en la bona direcció.

El tema a tractar està estretament lligat amb l'ètica mediambiental, la sostenibilitat i l'ecologia, de manera que aquest al·licient ha ajudat a desenvolupar un producte que pot ser clau de cara a la millora dels desplaçaments urbans. És un tema que de cara al present i al futur pren cada cop més pes precisament per a les aportacions econòmiques i ecològiques que se'n desprenen, i això no deixa de ser una altre motivació molt important.

A més, i pel que fa a la pràctica, el fet d'investigar sobre el desenvolupament d'una màquina elèctrica i comprovar mitjançant la seva simulació de forma digital com aquesta pot arribar a funcionar és un al·licient que ajuda a tirar endavant. Comprovar com cada modificació implica un nou resultat i una nova millora també motiva en el dia a dia i ajuda a continuar.

Per últim dir que el fet de seguir amb la investigació que van començar companys de la universitat i veure que la seva feina s'està aprofitant per a millorar el seu producte és quelcom a posar en valor i que també és una tasca gratificant.

### 1.4. Estructura del treball

Aquest treball final de grau està estructurat en diversos apartats per a poder focalitzar-se en els diversos punts que es consideren de més rellevància. Aquests punts van conduint al lector cap a l'objectiu de l'estudi realitzat i finalment s'extreuen unes conclusions.

El primer pas consisteix en realitzar un petit 'estat de l'art' per tal de conèixer la realitat de les bicicletes elèctriques actuals i com s'afronta el seu futur, de cara a les novetats i a les possibles tendències. A més, s'explica la normativa actual de les bicicletes elèctriques i el perquè de la

seva implantació. Aquí també s'identifica el tipus d'usuari d'aquestes bicicletes i el perquè d'aquesta elecció.

A continuació s'exposarà del funcionament de la bicicleta elèctrica, quins són els seus components principals, i quina funció fan cadascun d'ells, per tal de conèixer a fons l'entorn del producte que es vol desenvolupar.

Com que el treball es vol focalitzar en el motor de la bicicleta elèctrica, hi ha un apartat dedicat exclusivament a parlar-ne, en el qual es presenten diferents tipus de motors, el plec de condicions que ha de complir el motor seleccionat i posteriorment el disseny del motor que s'ha considerat més òptim per al fi que es persegueix. Posteriorment es parlarà de com desenvolupa la seva tasca el controlador del motor i per a què serveix.

A continuació, es plantejarà un procés d'anàlisi del motor i millores a aplicar per tal de veure com es varien diferents paràmetres geomètrics del motor, per tal d'obtenir cada cop millors resultats, com s'analitzen i com es va definint cada cop millor quin serà el prototip final.

Més tard, per tal de veure quins resultats ofereix aquest motor en funcionament, es desenvolupa un programa de simulació d'aquest on s'hi representen les parts que fan possible el control i en definitiva el funcionament del motor.

Seguidament, es procedirà a realitzar els assajos de validació que mostren si el motor dissenyat és vàlid o no per al que ha estat desenvolupat. S'analitzaran les seves corbes de parell i d'eficiència, i es proposaran comparatives de models.

A continuació es realitzarà un estudi sobre quin seria el resultat de la reducció de les dimensions d'aquest motor i si aquestes afectarien de forma negativa a les aportacions que realitza fins al moment.

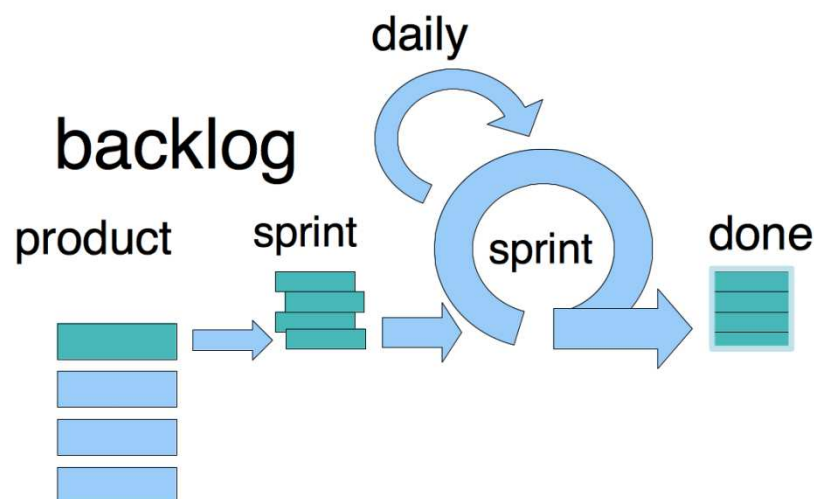
I per últim, s'analitzarà la viabilitat del motor dissenyat tot comparant-lo amb un model més antic, i es podrà veure si el nou model dona resultats més positius pel que fa a l'aportació més rellevant desitjada.

## **1.5. Metodologia de treball**

El present projecte s'ha desenvolupat seguint les directrius marcades per les metodologies de treballs àgils. Aquestes proporcionen una sèrie de recursos i indicacions que ajuden a seguir un mètode de treball que és molt útil tant per a projectes de llarga durada com per a treballs en grup.

En el cas del projecte que ens ocupa ha pres gran rellevància la metodologia anomenada SCRUM. Aquesta ajuda a adoptar una estratègia ràpida i ben organitzada de les diferents tasques i qui les ha de desenvolupar en funció del seu grau de coneixement de la matèria relacionada. A més, permet treballar de forma simultània diferents 'fases' del treball enlloc de fer-ho de forma seqüencial i això ajuda a l'aprofitament màxim del temps del que es disposa.

En concret el mètode es basa en l'autoorganització del grup de treball, que mitjançant reunions planifica les tasques que es volen realitzar, anomenades altrament '*backlogs*'. Aquestes tasques són ordenades en funció de la seva prioritat i també segons la seva dificultat. Els '*backlogs*' han de ser tasques que es puguin mostrar a la resta de membres de l'equip i de forma conjunta es pugui valorar el que s'ha fet, treure conclusions i fer retroaccions en cas que sigui necessari, ja sigui perquè el resultat no és l'esperat o bé perquè no s'ha complert amb l'objectiu de la tasca. Aquest conjunt d'accions, que es coneixen amb el nom de '*sprints*', ajudaran a desenvolupar de forma ordenada i donant prioritats clares a l'hora de treballar.



Il·lustració 1. Esquema de la metodologia àgil SCRUM.

El mètode estableix la realització de reunions diàries o setmanals on es mostren les solucions i les respostes trobades, i de forma mensual, es planifica una reunió o DEMO amb tot l'equip que forma part del projecte per a fer una retroacció de les solucions que s'han trobat i dels problemes o dificultats que han tingut lloc.

Aquesta DEMO fa que s'exposi l'experiència obtinguda i que des de fora es facin suggeriments, observacions, i aportacions de noves idees que poden ajudar a millorar el procés i a evitar

noves problemàtiques. A més, el fet d'exposar públicament allò que s'està fent i quin caire va prenent el treball, ajuda al desenvolupament oral i a perdre la vergonya a parlar en públic.

Val a dir, que al ser un treball individual la metodologia ha variat una mica, tot i que s'ha seguit de forma rigorosa el procés de realització de les tasques i els *sprints* per anar avançant en el projecte i focalitzar-se en els seus objectius.

Pel que fa a la part del disseny del motor, s'ha utilitzat una metodologia de treball anomenada enginyeria concurrent, i que engloba una sèrie d'eines que estan encaminades al desenvolupament d'un producte [BLA01].

## 1.6. Precedents i participació

Pel que fa aquest treball, cal destacar que hi ha un projecte anomenat '*Estudi de la viabilitat de l'ús d'un motor generador en el desenvolupament de bicicletes elèctriques*' realitzat per companys de la universitat i en el qual vaig participar activament. Aquest treball preliminar va comportar una tasca d'investigació i assajos per a contextualitzar el fet de desenvolupar un motor per a bicicletes elèctriques que fos capaç de funcionar també com a generador i veure si seria capaç de retornar energia al sistema de bateries, donant com a resultat que era viable.

A més realitzava una exhaustiva tasca sobre l'estat de l'art de la bicicleta elèctrica, els motors més utilitzats per aquest tipus de vehicles, i una investigació punyent sobre quin tipus de sistema d'emmagatzematge d'energia ha de tenir (bateries).

EL grup de treball, estava format un total de 5 estudiants: una enginyera de disseny, un enginyer electrònic, un enginyer elèctric i dos enginyers mecànics. I tothom va poder participar activament en la realització del projecte posant cadascú el seu gra de sorra pel que fa a la seva especialitat, i treballant en equip a l'hora de fer les tasques més complicades.

Durant la realització d'aquest projecte multidisciplinari vaig participar activament en diverses activitats formant-me i ajudant als meus companys a complementar el treball del dia a dia i que servien també com a motivacions. Finalitzat el treball, es va anar a la fira de la bicicleta que se celebrava a la Fira de Barcelona i es va realitzar una ponència, es va fer una entrevista amb l'excampió de Bike-trial Ot Pi que va servir per a conèixer les exigències dels usuaris i resoldre inquietuds pel que fa al món de la bicicleta, i també es va anar a la fira 'Expoelèctric' on es va poder viure de primera mà com la tecnologia es desenvolupa i cada dia arriba més enllà i de forma més sostenible i eficient.



## 1.7. Consideracions mediambientals

El projecte desenvolupat està estretament lligat amb la sostenibilitat i l'ètica ambiental. A més, durant la seva realització s'han tingut en compte diversos aspectes que fan referència a la bona praxis vers el medi ambient.

L'elaboració d'aquest treball no ha comportat el malbaratament de fulles de paper ni de tinta ja que no s'han realitzat més impressions de les que eren estrictament necessàries per a treballar de forma correcta i ordenada.

Tampoc s'ha construït de forma física cap prototip o maqueta del motor en qüestió i que hagués comportat un important consum de materials i d'energia, ja que el mètode de treball està associat a l'enginyeria concurrent, i el producte no es fabricarà fins que no estigui definit de forma correcta.

El fet de realitzar simulacions del comportament de diferents tipus de motors i anar variant els seus paràmetres físics, mitjançant diversos programes informàtics, implica l'estalvi d'una bona quantitat de temps, energia i recursos en la construcció d'aquests prototips de motors, que podrien haver estat assajats en un banc de proves per a poder testear-los i arribar a treure resultats similars.

A banda d'això, al llarg de la memòria es té cura d'aspectes lligats a l'eficiència dels motors i el compliment de normatives entre d'altres aspectes, fets que estan estretament lligats al respecte pel medi ambient i a la sostenibilitat.

## 2. Estat actual de la bicicleta elèctrica

Per començar a desenvolupar un motor per a una bicicleta elèctrica, el que s'ha volgut fer és investigar cap on avança el mercat i quines tendències s'estan imposant. També s'ha volgut conèixer quines són les necessitats dels usuaris d'aquests productes, i quines són les noves oportunitats que ens brinda el canvi de normativa que es va produir fa pocs anys i que regula tot aquest tipus de vehicles.

### 2.1. Tendències actuals

Aquest apartat està centrat en detectar quines són les tendències actuals del mercat de la bicicleta elèctrica. També quins són els factors als quals es destinen més recursos i quins són els àmbits de millora desenvolupats en cada cas. Els focus actuals d'investigació i desenvolupament ajudaran a definir el valor de mercat de la nova proposta de motor, si s'allunya o no de les noves accions que es duen a terme en el món de la bicicleta elèctrica, i si aquesta serà ben acceptada pel mercat. També aquestes noves tendències poden servir a implementar noves línies d'investigació pel que fa al desenvolupament de motors per a bicicletes elèctriques.

Per començar, la 'SDURO HARDSEVEN SL' és una bicicleta de muntanya per als usuaris més exigents que combina un motor Yamaha que ofereix un parell de fins a 70 N·m i una bateria de Lítio-Liti que permet un màxim d'autonomia de 140 km amb un temps de recàrrega màxim de 3 hores. El seu pes és de 20,2 kg.



Il·lustració 2. SDURO HARDSEVEN SL

Al mercat també hi trobem altres tipus de propostes com ara el kit de conversió 'Rubbee, que és un mecanisme ideal per a la conversió d'una bicicleta normal en una bicicleta elèctrica.

Aquest sistema s'instal·la entre la part superior de la roda posterior i el seient de la bicicleta. La proposta d'aquest producte, és minimitzar el temps de conversió, que segons els seus fabricants, és menor al d'un minut. El pes del producte és de 6,5 kg i es pot transportar amb facilitat.



Il·lustració 3. Kit per a conversió e-Bike Rubbee

Una altra solució d'aquest tipus és la 'Roda Copenhagen'. Desenvolupada per el MIT (Institut Tecnològic de Massachusetts), és un *kit* que permet transformar una bicicleta normal en una bicicleta elèctrica. Per fer-ho, l'usuari tan sols ha de canviar la roda posterior de la bicicleta per a aquesta nova, i amb això ja disposarà de la solució desitjada, ja que la roda incorpora el motor i la bateria dins seu.



Il·lustració 4. Roda Copenhagen

També es vol destacar la bicicleta 'Coboc eCycle', que ha estat guanyadora a la fira Eurobike, celebrada a Alemanya aquest any 2014, dins de la categoria de bicicletes elèctriques. El seu pes és de tan sols 14 kg i la bateria va integrada dins l'estructura de la bicicleta.



Il·lustració 5. Coboc eCycle

El '3D VR' és el primer model de bicicleta elèctrica que no consta de cadenes. És de tipus plegable i d'àmbit urbà. Ha estat desenvolupada de forma conjunta per el fabricant coreà d'accessoris per a automòbils Mando, l'empresa Meister, el dissenyador Mark Sanders, de l'empresa Footloose, i l'expert en bicicletes elèctriques Han Goes.



Il·lustració 6. 3D VR. Primera e-bike plegable sense cadenes

Una altre tendència del mercat actual és la experimentació amb els diferents materials, com és el cas de Wooden e-bike, una proposta del dissenyador belga Kasper De Backer, que com es pot veure ha desenvolupat un model fet amb fusta, i que dona un aire totalment diferent a la bicicleta elèctrica a la qual estem acostumats.



Il·lustració 7. Wooden e-bike

La 'Faraday Porteur', és la guanyadora del concurs de disseny *Oregon Manifest bicycle design competition*. La proposta combina la imatge clàssica de la bicicleta, amb l'actualitat tecnològica del món de les e-bikes.



Il·lustració 8. Faraday Porteur

Un altre exemple de bicicleta elèctrica sense cadenes és la 'Bike 2.0' proposada pels dissenyadors Kyoko Inoda, Nils Sveje, Gustavo Messias i Peter Anderson. Es caracteritza per proporcionar a l'usuari un disseny compacte i segur, és de fàcil manteniment i amb la possibilitat de personalitzar els elements desitjats per aquest.



Il·lustració 9. Bike 2.0. Bicicleta elèctrica sense cadenes

La 'Gi e-bike' és un model de bicicleta elèctrica plegable també d'àmbit urbà. La proposta de valor d'aquest model recau en la facilitat i rapidesa del plegat i desplegat, optimitzant la portabilitat. També inclou la tecnologia Wireless per controlar remotament mitjançant un smartphone, el sistema antirobatoris que integra el producte.



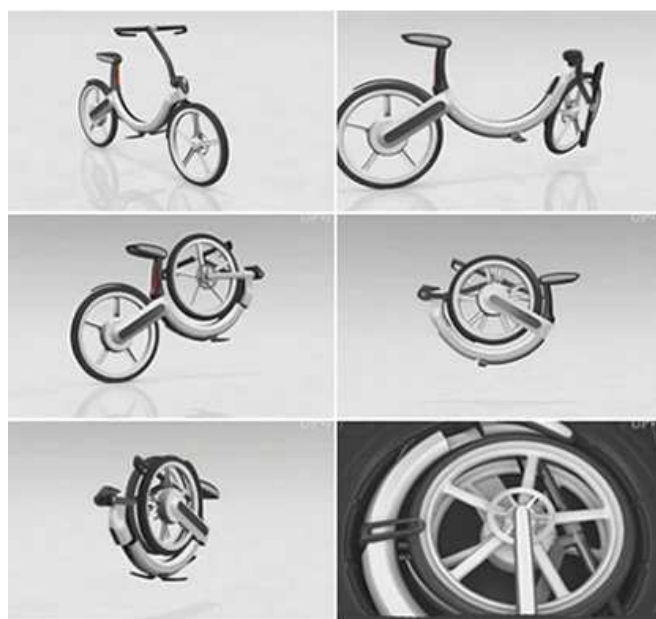
Il·lustració 10. Bicicleta elèctrica plegable Gi e-bike

També s'ha observat que existeix una certa tendència per a les propostes de disseny formalment futurístiques, com ara l'"HMK 561". Aquest model, fet de fibra de carboni per a potenciar la seva lleugeresa, no disposa de pedals ni cadenes com es pot veure a continuació.



Il·lustració 11. Bicicleta elèctrica de fibra de carboni HMK 561

Un altre fet destacat és que cada vegada més empreses d'automoció s'estan introduint en el mercat de les bicicletes elèctriques. El model de la imatge és el d'una bicicleta elèctrica d'àmbit urbà, ultraplegable, proposada per l'empresa alemanya Volkswagen. Aquest tipus de proposta són molt potents, ja que aquestes empreses estan fortament assentades en el mercat, i per tant disposen de tota mena de recursos per al seu desenvolupament i dona una bona imatge de cara als seus potencials clients.



Il·lustració 12. Bicicleta elèctrica plegable Volkswagen

Un altre model futurista és l'EBIQ'. Es tracta 'un concepte d'e-bike d'àmbit urbà, pensada per a l'ús col·lectiu i plegable de manera que es facilita el seu apilament. Com a nova proposta de valor, preveu una zona de recàrrega elèctrica per als aparells electrònics portàtils d'ús diari o



quotidiana, com per exemple un smartphone o una tablet i que s'abasteix amb el mateix pedaleig de l'usuari.



Il·lustració 13. Concepte de bicicleta elèctrica EBIQ

El model següent va ser finalista en el concurs de disseny Spark Awards del 2013. És un disseny de Mojtaba Raeisi, que proposa la integració de panells solars orientables, substituint els radis de la bicicleta, amb un angle de gir de fins a 30 graus. Amb aquesta aportació s'ha volgut millorar el rendiment, augmentant el subministrament energètic i integrant el factor mediambiental de l'ús d'energies renovables.



Il·lustració 14. Bicicleta elèctrica proveïda de panells solars Ele Solar Bicycle

L'«Apollo E-Bike», també està pensada per a ser utilitzada en un àmbit urbà, i a part d'haver sigut dissenyada per a poder plegar-se amb facilitat, s'ha pensat en un sistema de recàrrega



d'allò més innovador. Es tracta d'un cub fet amb materials reciclats que recarrega les bicicletes elèctriques únicament amb energia solar. Aquest cub es podria ubicar en qualsevol lloc de la ciutat gràcies al seu fàcil transport i la seva lleugeresa; de manera que una estació de recarrega sostenible i amigable seria fàcil de localitzar i permetria a l'usuari oblidar-se de l'inconvenient de recarregar sovint la bateria.



**Il·lustració 15. Bicicleta elèctrica plegable que es recarrega amb energia solar per mitjà d'un centre de mobilitat sostenible.**

Per últim, els model d'e-bikes de la casa de vehicles FORD, com són la bicicleta MoDe:Me i la MoDe:Pro, estan pensades per a l'ús comercial urbà, per exemple per a missatgers, transportistes, electricistes... Van equipades amb un motor de 200 W i combinen tecnologies ja aplicades a l'automoció com ara un sensor ultrasònic posterior que avisa, mitjançant la vibració al manillar, que el ciclista patirà un avançament, i il·lumina el manillar perquè la bicicleta sigui ben visible per al conductor que l'avança.



**Il·lustració 16. E-bike de MoDe:Me de la casa de vehicles FORD.**

## 2.2. Canvi de Normativa i la seva problemàtica

Abans de l'any 2009, no existia cap marc normatiu per tal de regular les bicicletes de pedaleig assistit, conegudes també amb el nom de 'epac'. Amb la introducció de la norma 'UNE-EN 15194:2009+A1:2012, Cicles. Cicles amb assistència elèctrica. Bicicletes EPAC.', es va establir un conjunt de regles i limitacions que han servit per a facilitar la labor als fabricants d'aquest tipus de vehicles, per estandaritzar-los, i per a poder treure'n el màxim profit de forma sostenible.

Aquesta creació de la normativa va ser impulsada per diversos motius.

Per una banda, es va voler diferenciar entre la bicicleta elèctrica i la motocicleta elèctrica. Fins ara, estava permès que els motors que equipen les bicicletes elèctriques poguessin estar en funcionament tot i que l'usuari no estigués pedalejant. Aquest aspecte suposava un cert grau d'inseguretat pel que fa a la relació producte – usuari. D'altra banda, la confusió entre les característiques d'una bicicleta elèctrica i una motocicleta elèctrica per part del client era una situació recurrent. D'aquesta manera, el canvi de normativa prohibeix el funcionament del motor sense que l'usuari estigui pedalejant, és a dir, el vehicle ha de ser de pedaleig assistit.

També es va voler limitar la velocitat i la potència de la bicicleta elèctrica, ja que la no regulació de la velocitat lineal màxima que podien arribar a agafar les bicicletes elèctriques, suposava una barrera inicial per als usuaris més inexperts d'una banda, i influïa en la confusió entre bicicleta i motocicleta d'una altra. Bàsicament, abans d'aquest canvi en la normativa, aquesta velocitat depenia sobretot de la capacitat de la bateria, que és la font d'alimentació del motor. Amb el canvi de normativa, la velocitat màxima a la que pot estar en funcionament el motor i, per tant, subministrant energia esdevé una dada concreta (com es veurà a l'apartat de normativa). Més enllà dels límits superiors i inferiors d'aquesta, el motor no pot estar en funcionament, ja que la seva única funció en aquest tipus de vehicle, és la d'assistir al pedaleig.

I per últim, es va voler establir una sèrie de limitacions pel que fa a l'autonomia i l'abastiment energètic de l'epac. Així doncs, l'usuari està obligat a realitzar la càrrega de la bateria de forma manual, i per tant, haurà de desinstal·lar-la i transportar-la fins a una font d'alimentació. Aquest fet implica que l'usuari de la bicicleta elèctrica s'ha de preocupar pel nivell energètic que disposa el sistema. També la manca d'iniciatives urbanes que solucionin aquesta problemàtica, com ara carregadors a la via pública, fa que aquest sigui un dels motius principals que es presenta com a impediment en el moment en que es vol adquirir un vehicle d'aquest tipus. També val a dir que les bateries són un element que evoluciona de forma lenta,

ja també ho fa el seu camp d'investigació, i comporta molts problemes de pes, tamany, cost i capacitat d'emmagatzematge d'energia.

### **2.2.1. Definició de les oportunitats de mercat**

De la informació provinent dels apartats anteriors, on s'han vist les tendències actuals en el món de la bicicleta elèctrica, i també quins són els seus principals handicaps, s'ha volgut localitzar on es troben les possibles oportunitats de mercat. Aquestes han de servir per a marcar objectius clars a aconseguir, o hipòtesis a tenir en compte per tal de poder experimentar amb el nou motor que es vol dissenyar.

Com que el major handicap pel que fa la bicicleta elèctrica és la durada de la seva bateria (pel que fa a la càrrega) i això va estretament lligat a la seva autonomia, aquest projecte ha volgut centrar la seva aposta de disseny cap a un motor que solucioni aquesta problemàtica. Per fer-ho, s'ha volgut estudiar un motor que té com a principal aportació, el fet de regenerar l'energia sobrant del sistema persona-bicicleta, i emmagatzemar-la de nou a la bateria de l'epac'.

### **2.3. Identificació d'usuaris**

Per tal de desenvolupar les millores en un disseny de motor que serveixi per a regenerar energia i treure'n el màxim profit, a banda de definir correctament tots els paràmetres que el caracteritzen, s'ha de conèixer quin ús tindrà aquest motor, i per tant a quin tipus d'usuari anirà destinat.

Com que el motor que es vol millorar encara no és una realitat encara, i la seva aplicació en el món de la bicicleta pot tenir un usuari tipus bastant difús, s'han volgut concretar diversos aspectes que el farien idoni per a utilitzar el producte que s'està redissenyant.

S'ha pensat en un usuari que sigui resident en una ciutat o que faci molta vida en ella. Ha de ser una persona amb capacitats i possibilitats d'utilitzar una bicicleta de tipus urbà ja sigui elèctrica o no. També ha de mostrar interès per la utilització del transport públic, sigui o no usuari habitual d'aquest. Ha d'estar sensibilitzat amb el medi ambient i conèixer les conseqüències de les emissions de gasos contaminants a l'atmosfera. Ha de ser una persona amant de l'esport i l'exercici físic, però no cal que sigui un professional del ciclisme. No s'han volgut posar limitacions en quant a edat i gènere, entenent que l'ús d'una bicicleta comprèn un rang d'edats que poden anar més o menys dels 6 als 70 anys (depenent de la salut de l'usuari òbviament). Per últim, val a dir que l'usuari ha de tenir cert poder adquisitiu ja que es

tracta d'un vehicle amb un cost més elevat que de costum, ja que el motor i la bateria són parts que encareixen força el seu cost.

### 2.3.1. Necessitats de l'usuari

Per a definir les necessitats de l'usuari s'ha seguit la mateixa pauta que venia establerta en el projecte '*Estudi de la viabilitat de l'ús d'un motor generador en el desenvolupament de bicicletes elèctriques*'. En ell, es va realitzar una entrevista a l'excampió de biketrial Ot Pi, i se'n van obtenir diverses conclusions pel que fa a l'usuari i a la bicicleta. Així doncs, s'ha volgut refrescar l'experiència i aprofitar el màxim tot allò que va generar.

A mode de resum, es va concloure el següent:

- L'usuari valora molt l'autonomia de la bicicleta, que va directament lligada amb la capacitat de càrrega de la bateria. És conscient que aquesta s'esgota i que necessita saber en tot moment quanta disponibilitat té. No està content amb el fet d'haver d'endollar la bicicleta o haver de desmuntar la bateria per a poder carregar-la.
- L'usuari no coneix la problemàtica del l'alt cost de la bateria i la poca reciclabilitat dels seus elements. Tampoc són conscients que les bateries tenen un determinat cicle de vida i que tard o d'hora, depenent de l'ús que se'n faci, s'hauran de canviar per unes de noves.
- L'usuari tipus de bicicleta urbà no existeix, ja que hi ha molta diversitat. És un factor rellevant la ubicació geogràfica de la ciutat d'on sigui resident aquest usuari, per principalment factors culturals i climatològics. La imatge que es dona anant amb bicicleta, tot denotant una consciència per l'estat del planeta, i l'estat de forma són també factors lligats a l'usuari d'aquest tipus de vehicle.
- Pel que fa a la bicicleta elèctrica, és encara una gran desconeguda en el nostre país però en d'altres, on hi ha molta més conscienciació pel medi ambient, la bicicleta elèctrica està esdevenint un boom important, i té un gran nombre d'usuaris. Aquesta desconexió fa que molts dels possibles usuaris no coneguin el fet que la bateria es descarrega de forma constant amb el seu ús i que no existeix encara de forma estandarditzada un mètode de recuperació d'energia que estalvi costos energètics i emissions nocives al planeta.

Així doncs, arribats a aquest punt es poden començar a perfilar aspectes més concrets de quines necessitats ha d'acomplir el producte per tal que l'usuari es senti satisfet amb allò que aquest li proporciona.

S'han llistat de forma general les necessitats dels clients potencials, tot i tenir en compte que l'usuari no té perquè ser un expert en motors elèctrics, electrònica o bateries.

Per que fa al manteniment, es vol:

- Unes bateries que disposin d'un cicle de vida gran.
- Que puguin prescindir de recàrrega manual.
- I que aquesta recàrrega s'efectuï de forma ràpida i sense maldecaps.

Pel que fa al funcionament:

- El motor ha d'arrencar i frenar de forma gradual per tal de garantir l'estabilitat de l'usuari i evitar sotracs innecessaris.
- És bo que hi hagi diferents nivells d'assistència al pedaleig.
- I es valorarà positivament la automàtica de les condicions del relleu on es circula, i que es graduï també de forma automàtica l'ajuda necessària en aquell moment, per tal de treure el màxim profit al motor.

Pel que fa a la seva utilització:

- El pes del conjunt ha de ser reduït ja que així serà més fàcil de manipular i transportar.
- És desitjable una aixa contaminació acústica.
- I com més fàcil sigui la seva conducció i menys comandaments tingui millor, ja que l'usuari no anirà tan atabalat.

## 2.4. Briefing

Els requeriments que haurà d'acomplir el producte envers les necessitats de l'usuari, fa que sigui imprescindible per a aquest projecte presentar un '*briefing*' o llistat de requeriments amb els quals es vol complir. Tots aquests han derivat de l'estudi realitzat anteriorment i coincideixen amb la seva totalitat amb el projecte que inspira aquest treball.

### **Denominació del producte**

'Motor elèctric per a bicicleta elèctrica'

## **Objectiu**

Millora de les característiques i resultats de la proposta de motor, que mantenint les seves facultats de transformació d'energia elèctrica en moviment per a la bicicleta, ha de ser capaç de generar suficient energia elèctrica per tal de poder recarregar la bateria del sistema.

## **Característiques del producte**

Pel que fa a aspectes normatius:

- Potència màxima de 250 W.
- Tensió màxima d'entrada de 48 V.
- Només pot funcionar el mode motor en un rang de velocitats que va de lineals de la 6 a 25 km/h.
- El mode motor només ha de funcionar com a assistència al pedaleig, és a dir, si l'usuari no pedaleja, el motor ha de deixar de fer-ho de forma gradual.

Pel que fa al producte:

- Es vol implementar un tipus de motor no convencional.
- Llibertat en l'elecció dels materials (adequats a l'efecte), és important que siguin lleugers i que no siguin cars.
- Ha d'aprofitar la força que es genera en el moment de la frenada de la bicicleta per a funcionar com a generador tot i que també es contemplen altres possibilitats, com ara aprofitar l'excés de velocitat, i ajudar a regular la mateixa.
- Ha de tenir diferents nivells d'assistència al pedaleig per a diferents tipus d'usuaris i pendent.

Pel que fa al context:

- Les dimensions han d'estar adaptades a bicicletes d'àmbit urbà.

I pel que fa a l'usuari:

- Aquest no cal que sigui un professional del ciclisme.
- És bo que estigui sensibilitzat pel medi ambient.
- No hi ha limitació d'edat o gènere.
- Tampoc n'hi ha pel que fa al poder adquisitiu.

### 3. Funcionament de la bicicleta elèctrica

En aquest apartat es pretén exposar com és el funcionament d'una bicicleta elèctrica convencional, quines són les seves entrades i sortides d'energia i com és controla aquest tipus de motor per tenir clares les consideracions de disseny. Per altra banda, també es vol presentar quin són els components bàsics que conformen aquest tipus de bicicletes i fer una breu pinzellada sobre les aportacions que realitza en el sistema d'assistència al pedaleig de cada un d'aquests elements.

#### 3.1. Funcionament bàsic

El primer que s'ha de saber és que un sistema de pedaleig assistit està conformat per diferents components, i que el conjunt de tots ells són els que permeten que l'e-bike tingui un control sobre la seva velocitat i compleixi amb la normativa vigent.

En tot sistema de pedaleig assistit hi trobem cert nombre d'entrades, és a dir, aportacions que venen de fora del sistema. Per una banda, tenim el pedaleig, que és l'aportament d'energia per part de l'usuari per a fer avançar el vehicle, i per l'altre hi tenim la bateria, que és la responsable d'alimentar de corrent al motor per tal que aquest impulsi cap endavant la bicicleta.

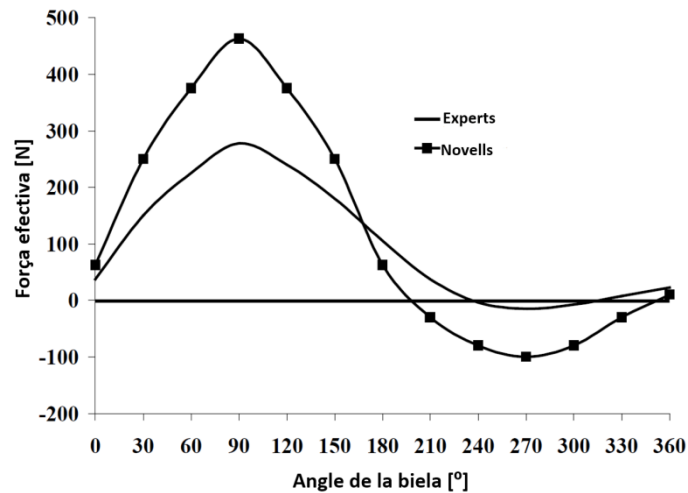
##### 3.1.1. Pedaleig

Pel que fa al pedaleig, s'han de tenir en compte dos aspectes que van molt lligats a l'usuari de la bicicleta: la cadència i la força.

La cadència és la velocitat a la qual l'usuari fa girar els pedals de la bicicleta. Aquesta, per a un ús merament urbà, on no es consideren grans pendents i existeixen límits de velocitat, arribarà a un màxim de  $120 \text{ min}^{-1}$ .

En canvi la força que s'exerceix durant el pedaleig és una variant que dependrà del nivell d'expertesa de l'usuari, i de la posició del pedal en el moment en que aquesta s'aplica.

Es pot observar el detall de la diferència entre el pedaleig d'un ciclista de nivell expert i un de novell segons un estudi inclòs en el llibre [MEC01] d'on s'ha extret la gràfica següent:



Il·lustració 17. Representació de la força exercida en un cicle de pedaleig d'una persona experta i d'una persona novell.

Això es deu al fet que els ciclistes novells aprofiten el moment de pujada del pedal per a exercir força també, i fan un pedaleig rodó, ja que en tot moment s'exerceix algun tipus de força. Els novells en canvi, no ho fan ja que la seva tècnica no és tant avançada i no ho permet, i fan el que es coneix amb el nom de pedaleig de pistó.

### 3.1.2. Transmissió del moviment

Ja que el moviment de les cames del ciclista fins al de la bicicleta passa per diferents fases s'ha volgut explicar de manera senzilla. Primer el ciclista transmet al pedal la cadència i la força necessàries per a moure'l. Com que aquest a través d'una biela va lligat al plat rep aquests paràmetres, i acte seguit ho transmet al pinyó a través de la cadena de la bicicleta. El pinyó és l'encarregat de transformar en moviment la nova força i cadència a la roda de la bicicleta. I aquesta última la permetrà avançar al conjunt ciclista-bicicleta.



Il·lustració 18. Esquema de la transmissió del moviment en una bicicleta.

Així doncs, segons l'equació del desenvolupament, es pot conèixer quina és la relació de transmissió entre la cadència del ciclista i la velocitat de la bicicleta segons [MEC02]:

$$\text{Desenvolupament [m]} = \frac{\text{Perímetre de la roda [m]} \cdot n^0 \text{ dents del plat}}{n^0 \text{ dents del pinyó}}$$



$$Velocitat\ lineal\ [m/s] = Desenvolupament\ [m] \cdot Cadència\ [rps]$$

### 3.1.3. Força, parell i potència del pedaleig

De la força (F) que exerceix l'usuari de la bicicleta en podem extreure de manera molt fàcil el seu parell, ja que coneixem la distància (d) de la biela del pedal. La potència també es pot obtenir de forma senzilla tot coneixent aquest parell (M) i la velocitat de gir (cadència) del pedal ( $\omega$ ). Les formules aplicades són les següents:

$$M = F \cdot d ; P = M \cdot \omega$$



Il·lustració 19. Biela solidaria amb el plat.

Així doncs, la potència que entrega el ciclista al sistema va lligat directament a la força que aquest exerceix, a la distància de la biela del pedal i a la velocitat de gir; a més del seu nivell d'expertesa.

### 3.1.4. Forces que actuen contra el moviment del ciclista

Hi ha diverses forces que actuen contra el moviment del ciclista i que són dignes de menció ja que aquestes hauran de ser vençudes si el que es vol és avançar amb la bicicleta:

#### Força de fregament amb el terra

És aquella que permet avançar la bicicleta ja que fixa la roda al terra al ser contraposada al moviment d'aquesta. Ve donada per la fórmula:

$$F_{fr} = M \cdot g \cdot \mu \cdot \cos\theta$$

#### Força de gravetat

Actua quan hi ha un pendent a vèncer. La seva formula és:

$$F_g = M \cdot g \cdot \sin\theta$$

## Força d'arrossegament

Es aquella que exerceix l'aire al impactar contra la superfície del ciclista i de la bicicleta. Depèn de la velocitat del conjunt i de la postura que adopta el ciclista a l'hora de pedalejar. La

formula és:  $F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot A_f \cdot v^2$

### 3.1.5. Força total del sistema

És el sumatori de totes les forces descrites en l'apartat anterior i seran les que haurà de vèncer el ciclista si el que vol és avançar amb la bicicleta. En el cas que ens ocupa, el ciclista es veurà ajudat a l'hora d'exercir aquesta força pedalejant endavant pel motor elèctric, que està alimentat per una bateria i controlat per un convertidor de potència.

## 3.2. Components principals

Els sistema d'ajuda al pedaleig està format per diversos components cadascun d'ells amb una missió concreta. Tot seguit ens disposarem a explicar quina és la seva funció i quins models es van escollir per a utilitzar en el projecte '*Estudi de la viabilitat de l'ús d'un motor generador en el desenvolupament de bicicletes elèctriques*' i on s'exposava el perquè d'aquesta elecció.

### 3.2.1. Motor

És l'element més important del sistema. La seva funció és la de transformar l'energia elèctrica en energia mecànica que permet que la bicicleta avanci. En el projecte '*Estudi de la viabilitat de l'ús d'un motor generador en el desenvolupament de bicicletes elèctriques*' hi ha una justificació del perquè de l'elecció d'un motor HRM en aquesta aplicació, però no és l'únic tipus de motor que es podria aplicar. Actualment el tipus més utilitzat en aquesta aplicació és el motor SRM ja que permet un tipus de control òptim i genera un bon parell que permet funcionar la bicicleta amb un bon comportament.

El projecte que ens ocupa té com a finalitat millorar el motor que es va proposar en el projecte esmentat, i per a fer-ho es duen a terme un conjunt d'accions que afecten directament al motor en diversos aspectes, com són: la seva forma geomètrica, la disposició dels seus pols, la millora d'espai per a les bobines, etc.

A part d'això, el motor HRM va ser escollit perquè gràcies als efectes dels imans és un motor que podrà proporcionar un excés d'energia a l'hora de funcionar a una velocitat determinada i permetrà recuperar aquesta energia i poder recarregar la bateria mentre el ciclista avança amb la bicicleta i el motor va girant.

### 3.2.2. Convertidor de potència

És una part transcendental en el conjunt del sistema d'ajuda al pedaleig. La seva missió és ajudar al motor a l'hora de definir el seu comportament i generar a través del control una sèries de paràmetres que permetran mantenir una velocitat constant o una progressiva ajuda a l'impuls de la bicicleta, a més de permetre que aquest motor que controla pugui funcionar en mode motor o mode generador. Així doncs, un convertidor de potència permet transformar l'energia elèctrica d'un determinat nivell de freqüència i voltatge a un altre depenent de la càrrega a la que està sotmès. Els semiconductors són la base dels circuits d'electrònica de potència i principalment actuen com a interruptors electrònics en un circuit electrònic per tal de canviar les característiques i la configuració del circuit. Mitjançant un circuit de control és com es podrà activar i desactivar aquests interruptors i permetre canviar les propietats del circuit i en conseqüència treure un millor profit del motor.

Per a aquest fi, en el projecte al qual es fa menció en altres apartats es va justificar l'elecció d'un convertidor clàssic o asimètric amb 6 interruptors MOSFET (interruptors controlats), i 6 DÍODES (interruptors no controlats), i serà amb el qual es treballarà en tot moment.

### 3.2.3. Sensors

Un sensor és un dispositiu que és capaç de detectar magnituds físiques o químiques i transformar-les en variables elèctriques.

En una bicicleta elèctrica hi podem trobar diferents tipus de sensors, tots ells amb una finalitat concreta. En primer lloc tenim el sensor de parell, que serveix per a determinar la força que exerceix el ciclista, després hi ha el sensor de posició, que detecta la posició del rotor del motor, també el sensor de velocitat, que detecta la velocitat del conjunt, el sensor de cadència, que determina la cadència que produeix el ciclista al exercir el pedaleig, i per últim, el sensor de corrent que serveix per determinar la intensitat de corrent que circula pel sistema de pedaleig assistit.

### 3.2.4. Bateria

La bateria és la font d'alimentació del motor, és adir, d'allà on el motor obté tota l'energia elèctrica que li permetrà funcionar.

Les bateries estan formades per cèl·lules galvàniques, que són petites bateries electroquímiques que mitjançant semireaccions en els electrodos, que es troben submergits

en una solució conductiva, conformen una reacció global que transforma l'energia química en elèctrica i a l'inrevés.

Actualment el mercat de les bateries és força extens i existeixen diferents tipus de bateries en funció dels seus components principals.

Primer de tot cal diferenciar entre dos tipus de bateries, les bateries primàries i les bateries secundàries. Les bateries primàries són aquelles que només es poden descarregar, és a dir, tan sols transformen l'energia química en elèctrica. En canvi, les secundàries conegudes també com a acumuladors, permeten l'intercanvi bidireccional entre l'energia química i l'elèctrica, per tant, es podran tornar a carregar.

Analitzant el mercat actual, i focalitzant en el món de les e-bikes, s'ha pogut observar com en l'actualitat les bateries més usades són de la família del ió-liti. Bàsicament els seus principals avantatges és que es tracta d'una bateria lleugera, que permet un elevat nombre de cicles de càrrega, amb un preu cada cop més raonable i una elevada densitat d'energia. A part, gaudeix de poc 'efecte memòria', la seva descàrrega és lineal i la seva taxa d'autodescàrrega és molt baixa. Per altre banda, els seus principals inconvenients són: una vida útil aproximada d'uns 3 anys, certa limitació de les càrregues, alt cost de fabricació, pitjor capacitat de treball en fred, i perill d'explosió.

A banda de l'ió-liti, al mercat també comencen a despuntar models de bateries de liti-fosfat de ferro, o l'òxid de liti-níquel-manganès-cobalt, que aporten més energia específica a la bateria però amb els mateixos inconvenients pel que fa a cicles de càrrega i durada.



**Il·lustració 20. Bateria escollida de la marca Ezee Fat Battery.**

En el projecte '*Estudi de la viabilitat de l'ús d'un motor generador en el desenvolupament de bicicletes elèctriques*' es va optar per una bateria de  $LiFePO_4$  de 36 V i 10 Ah per ser una de les que tenia millor qualitat preu i oferia unes bones prestacions. Com a principals característiques destacar: un límit de càrrega de 900 cicles, un temps de càrrega de 3,5 hores, un pes de 3,5 kg i un cost de 380€.

### 3.2.5. Reductora

Per tal de transformar el parell i la velocitat del motor elèctric cap a la roda per poder fer funcionar correctament la bicicleta, el motor ha de disposar d'una reductora.

El seu funcionament és molt senzill, a partir d'uns trens d'engranatges, l'energia mecànica pot ser entregada en condicions que permetin un ús més eficient i s'adeqüin a les necessitats del producte. És a dir, gràcies a aquests transmissors de potència és pot tant reduir com augmentar la velocitat de gir i fer exactament el mateix amb el parell que entrega el motor.

Una reductora permetrà doncs establir un aprofitament més bo pel que fa a la velocitat i al parell que entrega el motor, però per altra banda, necessitarà un manteniment habitual, tindrà unes pèrdues per fregament, generarà sorolls i també incorporará més pes al sistema d'ajuda al pedaleig de la bicicleta.

Per al motor que es vol fer servir, al ser el seu rang de velocitats entre 50 i  $200 \text{ min}^{-1}$  com així ho indiquen les especificacions tècniques i la normativa que fa referència als 'epac', no caldrà aplicar-hi un sistema d'engranatges que faci de reductora perquè el que ens entrega el motor és prou bo com per a treure'n profit directament.

## 4. Motor per a la bicicleta elèctrica:

Com ja s'ha dit, el motor elèctric és una de les parts fonamentals en el sistema d'ajuda al pedaleig per a una bicicleta elèctrica. És per això, que en aquest apartat es vol posar especial èmfasi en com és un motor per a una bicicleta elèctrica, quin és el seu funcionament, i quines millores pot adquirir a partir del seu redisseny i reajustament de paràmetres físics.

En aquest apartat s'expliquen quins tipus de motors es fan servir de forma més habitual per a aquest tipus d'aplicacions i quin és el seu principi de funcionament. A continuació s'escull un tipus de motor concret i s'exposen els motius d'aquesta elecció. Seguidament es presenta el plec de condicions que haurà de seguir el motor que es vol dissenyar. I per últim, s'expliquen quins paràmetres són els que caracteritzen un motor del tipus escollit, i que seran subjectes a modificacions per tal de fer variar el comportament del motor i treure'n un major profit.

### 4.1. Estat de l'art dels motors elèctrics per a e-bikes

Es fa un estudi dels possibles candidats de motors a utilitzar en una aplicació com la que ens ocupa. Veurem quins són els més utilitzats i perquè.

#### 4.1.1. Motor d'inducció (IMD)

Es tracta d'un motor que ofereix elevats parells a elevades velocitats, per tant requeriria d'una reductora per tal d'aprofitar al màxim el seu rendiment. Per altra banda, és un motor d'un cost elevat que requereix d'un control vectorial per al seu funcionament i a més no admet un canvi d'estructura. No és el més ideal per al nostre objectiu i al mercat no es coneix cap fabricant de bicicletes que l'utilitzi.

#### 4.1.2. Motor Brushless

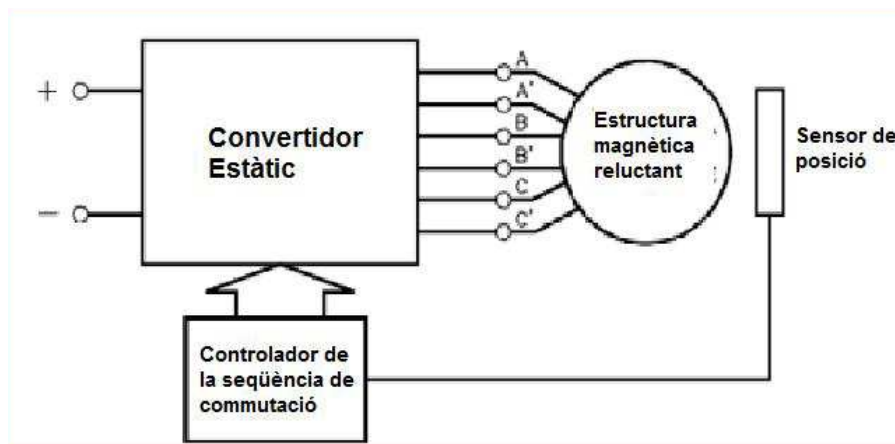
El motor brushless, és a dir, sense escombretes és un motor que no utilitza escombretes per a realitzar el canvi de polaritat al rotor ja que això comportava un gran nombre de pèrdues i aturades per manteniment. El seu control electrònic es realitza a partir d'un convertidor de potència, cosa que permet el seu ús tant en corrent continu com en corrent altern i representa una gran avantatge, ja que el rendiment que s'obté és molt similar al d'un motor de corrent continu amb escombretes. La gran majoria dels motors utilitzats en les e-bikes són brushless.

#### 4.1.3. Motor síncron amb imants (SPMMD)

La principal característica d'aquest tipus de motor és que ha de funcionar a la velocitat de sincronisme. Al tenir una bicicleta elèctrica una variabilitat gran i constant en el seu rang de velocitats això seria un impediment en quant a l'ús d'aquest tipus de motors a més de la complicació del seu control. Per altre banda, unes variacions brusques pel que fa al parell podrien fer perdre el sincronisme del motor. Al mercat es poden trobar alguns fabricants que utilitzen aquest tipus de motor però no és el més habitual.

#### 4.1.4. Motor de reluctància autocommutada (SRM)

Aquest tipus de motor no fa servir ni escombretes ni imants permanents, i disposa normalment d'una estructura magnètica relucant de pols sortints tant al rotor com a l'estator. Les bobines concentrades es troben situades als pols de l'estator i es connecten de forma diametralment oposada per tal de conformar les fases del motor. Per altre banda aquest motor necessita d'un convertidor estàtic per a poder alimentar les fases del motor en el moment precís, i per a fer-ho necessita d'un sensor de posició per al motor i un controlador de la seqüència de commutació.



Il·lustració 21. Esquema bàsic del control d'un motor SRM.

L'estructura relucant abans esmentada és un dels trets característics dels motors de reluctància autocommutats, i ve determinada en funció del nombre de fases ( $m$ ) i la relació entre el nombre del pols del primari i el nombre del pols del secundari ( $q = N_p/N_s$ ). És important que el nombre de pols assegurï l'engegada en qualsevol de les posicions del motor, i per tant, aquesta estructura sempre haurà de complir amb el següent precepte que afecta al

nombre de fases del secundari:  $N_s = 2 \cdot (m \pm 1)$ . Per altre banda el nombre de fases del primari sempre serà:  $N_p = 2 \cdot q \cdot m$ .

El funcionament d'aquest motor és ben senzill, en excitar-se una fase qualsevol del motor de reluctància autocommutada es produeix un parell que tendeix a alinear els pols del rotor amb els de l'estator que tenen aquesta excitació. Així doncs, gràcies a la lògica de control i els sensors de posició, que permeten conèixer la posició angular del rotor, es pot determinar quina fase cal activar en cada moment i fer girar així el motor a una velocitat i parells desitjats.

El moment d'excitació de cada fase es fa coincidir amb la posició d'inductància mínima, és a dir, quan els dos pols es troben en la seva posició no alineada. En el moment en que els pols de l'estator i del rotor es troben en posició alineada les inductàncies d'aquestes fases arriben al seu valor de màxima d'inductància. [BLA01]

Juntament amb el motor brushless, aquest tipus de motor és utilitzat actualment en bicicletes elèctriques, i s'assembla força a la solució adoptada.

#### 4.1.5. Justificació del Motor Híbrid de Reluctància (HRM)

El motor híbrid de reluctància té moltes similituds amb el motor SRM que s'acaba de descriure però aporta certes millores que cal destacar. La principal diferència és que combina la tecnologia dels imans juntament amb una estructura senzilla i de cost no gaire elevat, que permet que els seu funcionament sigui tan òptim realitzant tasques com a motor com al fer-ho com a generador.

Els imans eren un dels factors que feia elevar el preu del motor brushless però en el cas de l'HRM el seu preu no suposarà un gran contratemps seguit a que el nombre d'imans a utilitzar és molt inferior.

La seva estructura ve conformada per un apilament de xapes que conformen el gruix del motor, un bobinat per a cada fase que generarà un flux de corrent, una inductància magnètica i una força resultant que farà que el motor giri; i un iman, inserit a cada fase, que el que fa és reforçar aquest flux magnètic, al fer que segueixi circulant per la fase, quan el controlador ja no indica el pas de corrent per els seus corresponents bobinats.

Ja que el que es vol amb aquest projecte és aportar una regeneració d'energia en el dia a dia d'una bicicleta elèctrica i aprofitar tota l'energia sobrant que s'obté del gir del motor i de la velocitat del ciclista. Aquest darrer motor és el més idoni per tal d'assolir l'objectiu ja que dona bons resultats treballant com a generador i el parell que dona treballant com a motor també



assoleix unes prestacions prou bones. Per tant, es treballarà en el disseny d'un motor d'aquest tipus per a la nostra aplicació.

## 4.2. Plec de condicions

L'ús que se li vol donar al producte requereix que el motor aplicat per al seu funcionament segueixi la normativa que regula els 'epac', la UNE-EN 15194:2009+A1.

En aquesta norma venen determinats els requisits, paràmetres i limitacions que ha de tenir el motor en cada una de les seves fases de funcionament entre molts altres aspectes i és important destacar els aspectes de més rellevància que afecten directament a la tasca i al comportament del motor que es vol dissenyar i aplicar en aquest conjunt.

Segons la normativa **[NOR01]** es diferencien tres fases de funcionament del motor per als 'epac'. Aquestes són: la fase d'engegada del motor, la fase de funcionament del motor, i la fase d'aturada del motor.

1) La fase d'engegada; quan la situació de partida és que el motor i la roda estan completament aturats i a punt per a posar-se en marxa:

- En el moment en que existeixi una força de pedaleig cap endavant per part de l'usuari, es subministrarà potència al motor.
- La potència subministrada al motor haurà de ser gestionada de manera suau i progressiva.
- En aquesta fase en concret es pot incorporar un sistema d'ajut a l'engegada que no requereix que hi hagi pedaleig ni que la bicicleta estigui en moviment. Aquest sistema s'activarà de manera voluntària i constant per l'usuari, i finalitzarà la seva tasca un cop la bicicleta superi els 6 km/h.

2) La fase de funcionament del motor; quan el motor gira:

- Hi haurà subministrament de potència cap al motor de manera progressiva i controlada sempre que es mantingui el pedaleig cap endavant.
- El parell proporcionat pel motor vindrà ajustat en funció de la força necessària per avançar que apliqui l'usuari sobre el pedaleig. Així doncs, si l'usuari exerceix més força el motor proporcionarà més ajuda al sistema.
- Si es vol que el motor tingui diferents modes d'ajuda per a l'usuari, es pot dividir el seu comportament en diferents punts de funcionament. Així doncs, l'usuari podrà decidir en tot moment quin percentatge d'ajuda vol rebre del motor.

3) La fase d'aturada del motor; quan el motor deixa de subministrar ajuda al sistema:

- Quan la velocitat de la bicicleta superi els 25 km/h es deixa de subministrar potència per part del motor.
- Quan no existeixi pedaleig cap endavant, el motor no exercirà cap tipus d'ajuda al pedaleig.
- La potencia es redueix de forma progressiva, mai de forma brusca en aturar-se el pedaleig o al superar-se els 25 km/h.

A més, la normativa estableix altres limitacions importants a tenir en compte per al correcte funcionament del motor en les 'epac':

- Com a molt el motor podrà subministrar una potència nominal contínua de 250W.
- La tensió màxima a la que podrà ser alimentat el motor és de 48 V a CC.
- L'entrada del carregador de la bateria ha de ser apte per a 230 V.

#### 4.3. Paràmetres de disseny del motor HRM

Un cop es coneixen les especificacions concretes i el comportament que ha de tenir el motor que es vol desenvolupar, es pot determinar quin serà el procés per a dur a terme l'estudi les millores en el disseny del motor.

Així doncs es determina primerament què és el que es vol: dissenyar un motor que sigui capaç de funcionar com a tal i que a més pugui regenerar corrent quan funcioni com a mode generador per a poder alimentar la bateria. També es vol que no porti reductora, per tant ha de funcionar correctament al marge de velocitats adequat per a l'aplicació.

Seguidament es determina quin és el procés emprat per a realitzar aquest estudi: s'ha optat per partir d'algunes estructures concretes de motor MHR que poden ser candidates a donar el que es pretén i aplicar modificacions en la seva estructura, paràmetres constructius i ubicació d'elements per tal d'obtenir els millors resultats possibles. Posteriorment escollir la solució òptima i acabar d'adaptar-la per l'aplicació i requeriments establerts.

Pel que fa als aspectes més essencials que s'han de tenir en compte a l'hora de dissenyar un motor híbrid de reluctància (HRM) segons [MOT01] són:

- El nombre de pols de l'estator
- El nombre de pols del rotor

- El diàmetre exterior de l'estator
- El diàmetre exterior del rotor
- La distància de l'entreferro
- Distància angular dels pols de l'estator i el rotor
- Bobinatge de l'estator
- Aïllant exterior
- Nombre d'imants permanents

Per tant, a l'hora d'aplicar les modificacions en els dissenys de partida del motor, són aquests els paràmetres que s'han tingut en compte.

#### 4.3.1. Nombre de pols de l'estator i del rotor

El nombre de pols de l'estator  $N_s$  i el nombre de pols del rotor  $N_r$  han de complir sempre amb el següent precepte:  $N_s = 2mq$ , i  $N_r = 2(mq \pm 1)$ . On  $q$  és el nombre de fases del motor i  $m$  sol ser 1 o 2.

Per tal de reduir la freqüència de commutació i la mínima inductància, el nombre de pols del rotor ha de ser inferior al nombre de pols del estator. Però com en el cas de l'aplicació que s'estudia es realitza un disseny de rotor exterior, aquest factor és al contrari, per tant, el nombre de pols del rotor ha de ser més gran al nombre de pols de l'estator.

Així doncs, les configuracions típiques per a aquest tipus de motor són:

Q	m = 1			m = 2		
	Ns	Nr		Ns	Nr	
		"_"	"+"		"_"	"+"
3	6	4	8	12	10	14
4	8	6	10	16	14	18
5	10	8	12	20	18	22

Taula 1. Configuracions típiques de l'HRM.

#### 4.3.2. Diàmetre exterior de l'estator i del rotor

El diàmetre corresponent a la part exterior del rotor ve fixat per les dimensions de la carcassa del motor i pel diàmetre de la roda. Els diàmetres normalitzats per a rodes de bicicleta que han

servit de referència en aquest treball són: 20", 26", 27,5" i 29". Per altre banda, el diàmetre exterior de l'estator variarà en funció l'espai intern del que es disposi, però òbviament serà menor al diàmetre intern del rotor.

#### 4.3.3. Distància de l'entreferro

Per tal de conèixer quina és la distància idònia de l'entreferro, és a dir, quina separació hi ha entre el diàmetre interior del rotor i el de l'estator, se segueix el següent precepte:

$$\delta(mm) = 1 + \frac{D_r}{1000}$$

On  $\delta$  and  $D_r$  són la distància de l'entreferro i el diàmetre exterior del rotor, respectivament.

En el nostre cas, podem estimar que la distància de l'entreferro està compresa de forma habitual entre 0,3 i 0,6 mm. Degut a que l'aplicació treballa amb forts impactes ens quedarem amb el més gran possible.

#### 4.3.4. Distància angular entre els pols de l'estator i els pols del rotor

Aquest angle  $\lambda_s$ , que marca la distància entre els pols de l'estator i del rotor, s'obté de la següent expressió:

$$\frac{0,3\pi D_r}{N_s} \leq \lambda_s \leq \frac{0,35\pi D_r}{N_s}$$

On  $D_r$  és el diàmetre exterior del rotor,  $N_s$  el nombre de pols de l'estator.

#### 4.3.5. Bobinatge de l'estator

Per tal d'excitar els pols de l'estator es requereix d'unes bobines per on circularà el corrent. Aquestes estan formades per un cert nombre d'espises, i aquest nombre dependrà bàsicament per l'espai que pot ocupar el bobinatge entre fase i fase, de forma que no toqui amb cap altre part del motor, i de la secció del cable de coure del bobinat.

Per tal d'aproximar del nombre d'espises que es poden inserir en una àrea determinada, que estarà destinada al bobinat, se sol fer servir l'expressió següent:

$$\text{Nombre d'espises} = \text{Àrea bobinat} / 0,75$$

On Àrea bobinat és l'àrea lliure del bobinat en mil·límetres.

Val a dir que depenent de la secció del cable aquest divisor (0,75) pot arribar a valors de fins a 0,45. Això si, s'ha de tenir en compte que la col·locació dels cables dels bobinats envoltant als pols ha de ser físicament possible i que existeixen imprecisions en la situació física d'aquests.

#### **4.3.6. Aïllant exterior**

El gruix de l'aïllant exterior és un factor de certa importància ja que es tracta d'impedir que el corrent que circula pel motor i els camps magnètics que el travessen no traspassin la seva carcassa exterior. Al realitzar l'anàlisi estàtic del motor, es podrà comprovar si existeix saturació del flux magnètic dins de la seva estructura, si és així, el motor necessitarà més espai d'aïllant exterior. En cas contrari, es pot provar a reduir aquest espai i mirar de minimitzar costos de material aïllant.

#### **4.3.7. Nombre d'ímans permanents**

Com que cada fase del motor tindrà un iman permanent, el nombre d'ímants permanents que tindrà el motor serà el mateix que el nombre de fases. Tot i així, hi ha un model d'HRM que s'anomena 'de fases dobles' que obligarà a doblar també el nombre d'ímans que necessitarà el motor, sent aquests més petits.

## 5. Control del convertidor per al motor:

Tot seguit, es procedeix a explicar en què consisteix i com funciona el control del convertidor del motor. Aquesta és una part essencial del conjunt motor – convertidor, ja que sense aquest control el convertidor no coneix les ordres que ha de transmetre al motor i aquest no tindrà cap imposició pel que fa al seu comportament.

### 5.1. Estratègies de control

Les estratègies bàsiques del control del convertidor que s'ha escollit per aquest motor, i que com recordem és un convertidor clàssic amb 6 interruptors MOSFET i 6 díodes, estan dividides les tres tipologies següents [BLA01]:

#### 5.1.1. Puls únic

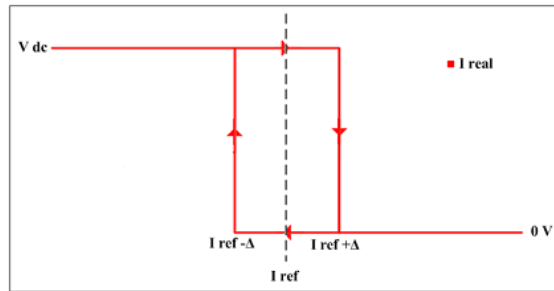
Aquesta estratègia de control consisteix en mantenir el puls del control constant durant tota l'angle de conducció per a cada fase. L'angle de conducció s'utilitza igual que l'angle de pas del motor, tot i que la seva variació permet un funcionament a potència constant. Si l'angle de conducció no es modifica i es manté la tensió constant, s'obté la característica de funcionament natural.

#### 5.1.2. PWN (Pulse With Modulation) control de tensió

Aquesta estratègia de control és utilitzada quan es vol mantenir un parell constant en funció d'una consigna donada. El procediment que segueix és el de comparar el corrent real amb el corrent de referència, i l'error que s'obté és comparat amb la senyal obtinguda d'un generador de senyal triangular. El resultat de la comparació són els polsos amb cicle de treball (Duty cycle) que s'aplicaran al circuit de commutació i control del motor.

#### 5.1.3. Histèresi (control de corrent)

El que realitza aquesta estratègia de control és generar una senyal de control per a ordenar al convertidor en quin moment ha de permetre el pas de corrent o no en funció del valor del corrent de la fase que es vol controlar i quin és el valor de corrent de referència (consigna). En comparar aquests valors de corrent, s'introdueix el resultat en el regulador d'histèresi i aquest permet variar el corrent entre uns valors màxims i mínims, el que es coneix com a banda d'histèresi.



Il·lustració 22. Característica del control per histèresis.

## 5.2. Estratègies de commutació

El controlador del convertidor té com a missió controlar els de conducció dels interruptors del convertidor mitjançant la generació de senyals que fan que aquests permetin o no el pas de corrent. Això ho fa a partir de les senyals de commutació i control que rep, i que obté mitjançant el processat de la senyal de posició del rotor, de manera que sap en tot moment quan ha de ser l'inici i quan el final de la conducció. S'utilitzen diferents estratègies de commutació: el SoftChopping, el HardChopping i combinacions de les dues [BLA01].

### 5.2.1. SoftChopping

Aquesta estratègia de commutació consisteix en obrir i tancar els interruptors de la franja superior de cada fase en funció de si es necessita més o menys corrent acord amb cada fase. Els interruptors responen a les senyals de control que es combinen amb les senyals de commutació, de manera que durant el temps de conducció de la fase, si es necessita més corrent, es tanquen els interruptors i, si es sobrepassa la consigna desitjada, s'obren. Per altre banda, els interruptors inferiors responen només al senyal de commutació.

### 5.2.2. HardChopping

Aquesta estratègia consisteix en obrir i tancar els interruptors superiors i inferiors de forma simultània, tot responent a les senyals de control que combinen amb la senyal de commutació. Així doncs, durant el temps de conducció de la fase si es necessita més corrent es tanquen els interruptors, si en canvi es sobrepassa la consigna, s'obren.

## 6. Procés d'anàlisi del motor i millores aplicades a l'HRM

Com s'ha dit diverses vegades, el que es vol mitjançant aquest projecte, és desenvolupar una solució òptima per a un motor que garanteixi el seu correcte funcionament com a tal i que sigui capaç de generar corrent per alimentar un sistema de bateries. El motor que s'escull per a fer-ho possible és el motor híbrid de reluctància (MHR), i el que es vol és estudiar quin tipus de disseny és l'idoni per a fer-ho possible, i quines variants geomètriques i dimensionals són les que poden millorar el seu rendiment i la seva funcionalitat.

Per iniciar l'estudi, es parteix de dos tipus de dissenys de motor HRM clarament diferenciats i que poden ser igualment vàlids per a l'aplicació.

Les dimensions pel que fa al diàmetre exterior del motor i el gruix seran sempre les mateixes ja que la seva ubicació física no ha de canviar, però si es fes alguna modificació al respecte per estudiar què comportaria vindrà indicada de forma clara. Se segueixen els preceptes indicats en **[MOT02]** per a la millora de resultats en els dissenys.

Aquestes dimensions venen limitades per l'amplada de la forquilla de la bicicleta (oscil·la de 81 a 100 mm) i el diàmetre de la roda (entre 25,4 i 28,6 mm). Això fa que el motor haurà de tenir com a màxim diàmetre exterior de 220 mm i una amplada de com a molt 80 mm per a poder encabir-hi el control i la carcassa.

Es començarà fent un estudi del que s'ha anomenat *model 1*, on es veurà quines són les seves principals característiques, quina és la seva forma geomètrica i l'anàlisi dels resultats obtinguts a partir de l'assaig estàtic realitzat amb el programa FEMM.

El mateix es farà amb un altre disseny anomenat *model 2*, i es podrà fer la primera comparativa, tot veient quins avantatges aporta un model constructiu sobre l'altre i quins inconvenients tenen.

El següent pas serà aplicar modificacions a aquests models i veure si aquestes afecten directament al comportament del motor, seguir comparant resultats i treure conclusions. Això durà al punt en que tindrem dos models diferenciats els quals s'hauran millorat el màxim possible i es podrà procedir a un assaig dinàmic, del model que aparentment pugui resultar millor per a l'aplicació. Així doncs, aquests assajos dinàmics donaran lloc a unes gràfiques que descriuran el seu comportament com a motor i com a generador i es podrà decidir quin dels models és el millor per a l'aplicació i perquè.



## 6.1. Anàlisi dels models de partida

### Model 1:

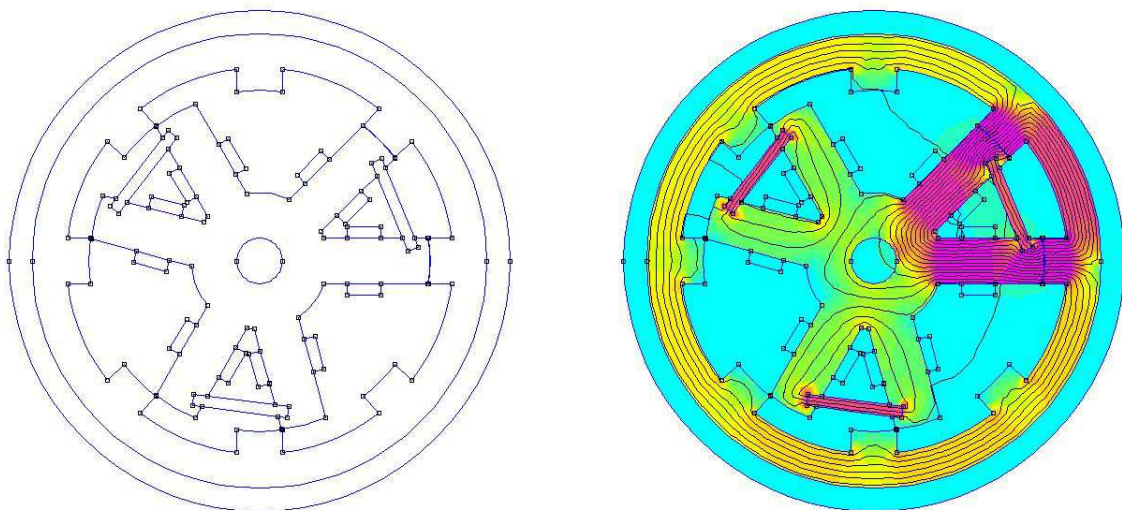
Es tracta d'un disseny pensat per a rodes grans, de 26", 27.5" i 29" i amb una amplada de forquilla de la bicicleta normal.

La taula de característiques que descriuen el primer model de motor a analitzar és la següent:

<b>Número de pols a l'estator</b>	6
<b>Número de pols al rotor</b>	8
<b>Número de fases</b>	3
<b>Diàmetre exterior</b>	220 mm
<b>Gruix general</b>	50 mm
<b>Amplada de pols del rotor</b>	20 mm
<b>Amplada de pols de l'estator</b>	20 mm
<b>Stroke (angle de pas)</b>	45°
<b>Nombre d'espises a cada pol</b>	100

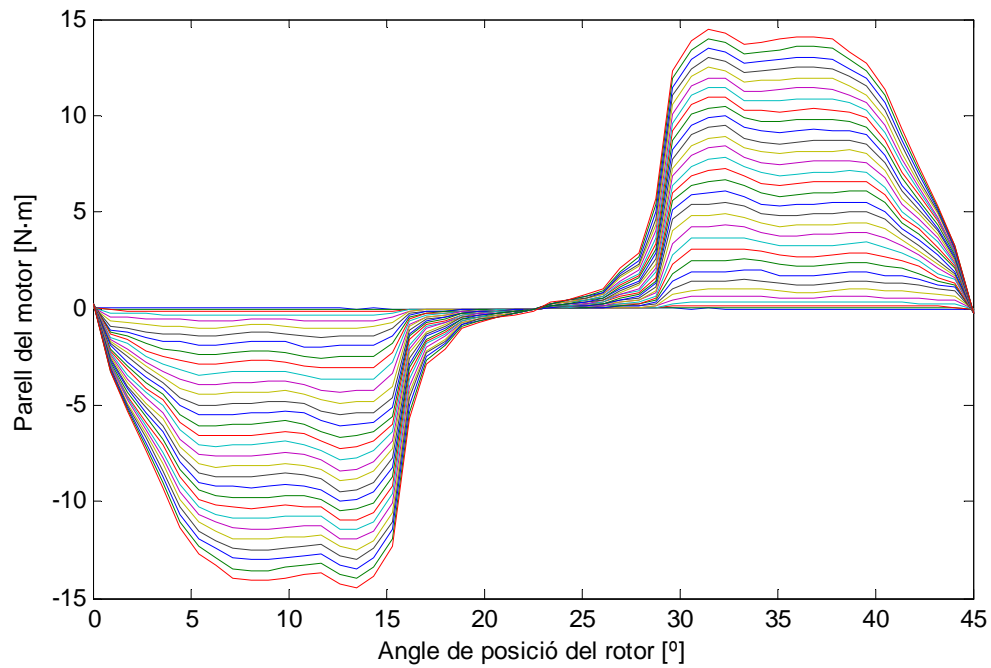
Taula 2. Característiques del model 1 de partida

La seva estructura és la que es mostra a continuació:

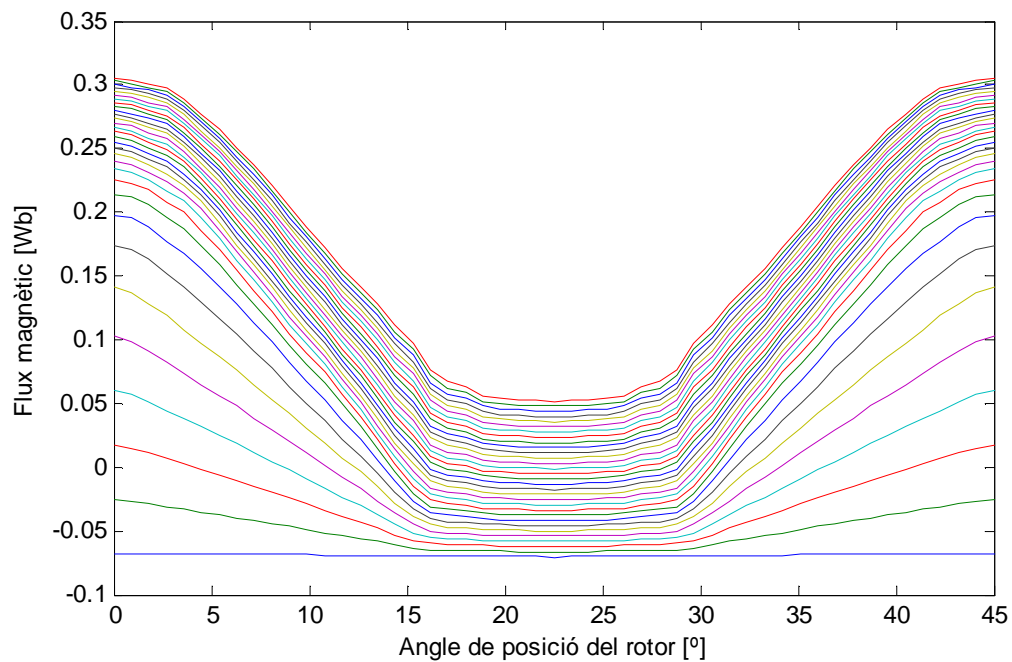


Il·lustració 23. Esquerra; dibuix del model 1 de partida per a roda gran.  
Dreta; anàlisi de l'estructura mitjançant el programa FEMM

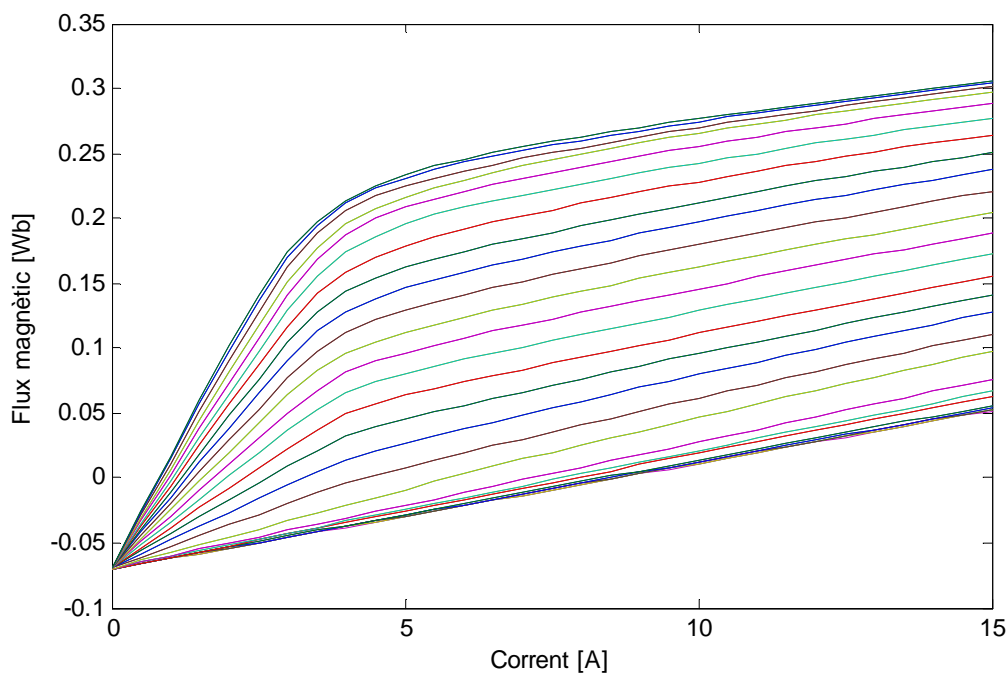
I els resultats que s'han obtingut de l'anàlisi estàtic són els següents:



**Gràfica 1. Model 1: Representació del parell segons l'angle de posició del rotor i per a cada corrent determinat a l'ANNEX B**



**Gràfica 2. Model 1: Representació del flux segons l'angle de posició del rotor i per a cada corrent determinat a l'ANNEX B**



Gràfica 3. Model 1: Representació del flux segons el corrent i per a cada angle determinat a l'ANNEX B

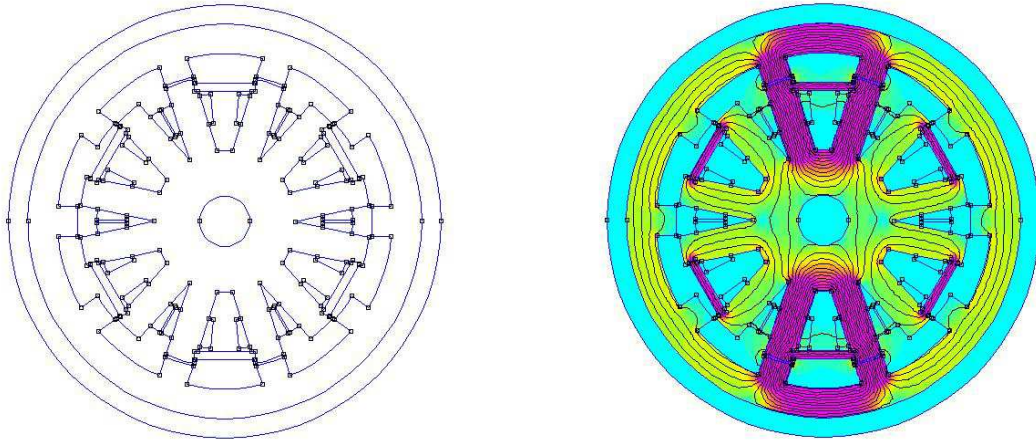
#### Model 2:

La taula de característiques que descriuen el segon model de motor a analitzar és la que es descriu a continuació. A destacar l'estructura de fases dobles que segueix aquesta nova forma constructiva i que pot comportar certs avantatges respecte l'estructura anterior. Es mantenen les dimensions pel que fa al diàmetre i a l'amplada del motor:

Número de pols estator	12
Número de pols rotor	10
Número de fases	3
Diàmetre exterior	220 mm
Gruix general	50 mm
Amplada de pols del rotor	15
Amplada de pols de l'estator	15
Stroke	36°
Nombre d'espises a cada pol	100

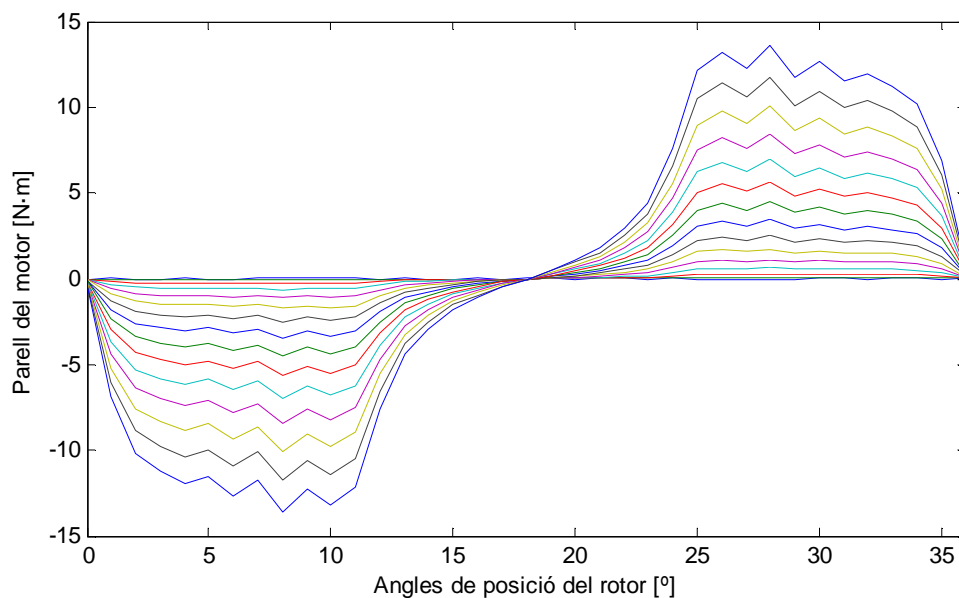
Taula 3. Característiques del model 2 de partida

El disseny està pensat per a rodes de les mateixes dimensions que s'han enumerat en el model 1, i el gran tret diferencial respecte aquest model és que té una estructura de fases dobles, és a dir hi ha dues fases que s'exciten al mateix temps i això fa que el moment que exerceix el motor no vingui donat per una força aplicada en un sol punt sinó en dos:

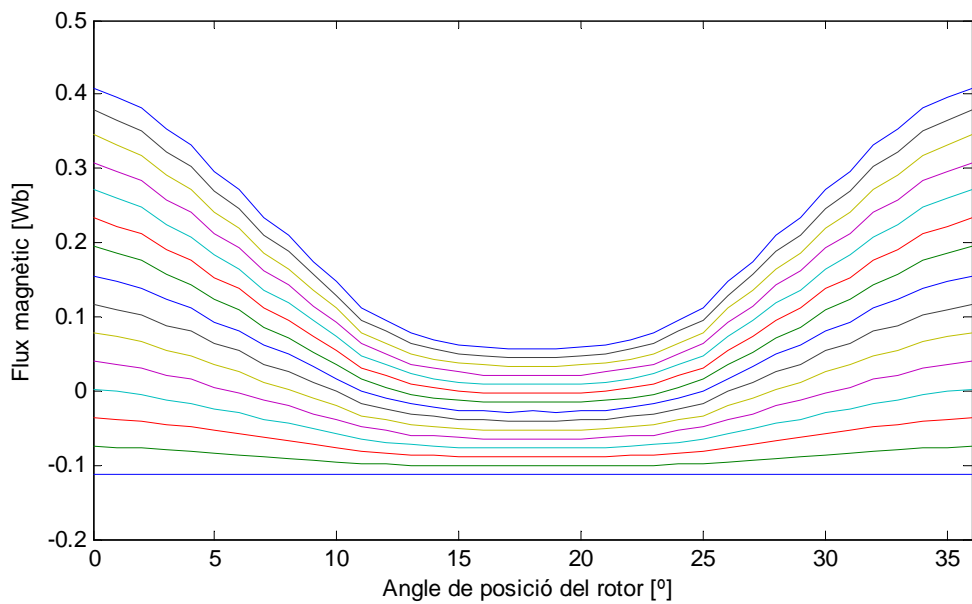


Il·lustració 24. Esquerra; dibuix del model 2 de partida per a roda gran.  
Dreta; anàlisi de l'estructura mitjançant el programa FEMM

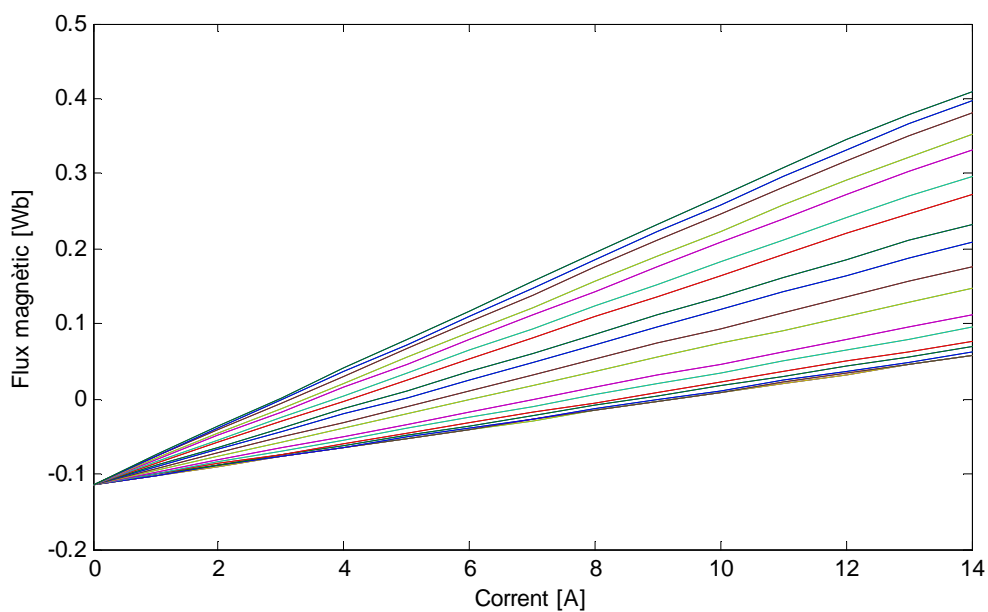
Els resultats de l'anàlisi estàtic són els següents:



Gràfica 4. Model 2: Representació del parell segons l'angle de posició del rotor i per a cada corrent determinat a l'ANNEX B



Gràfica 5. Model 2: Representació del flux segons l'angle de posició del rotor i per a cada corrent determinat a l'ANNEX B



Gràfica 6. Model 2: Representació del flux segons el corrent i per a cada angle determinat a l'ANNEX B

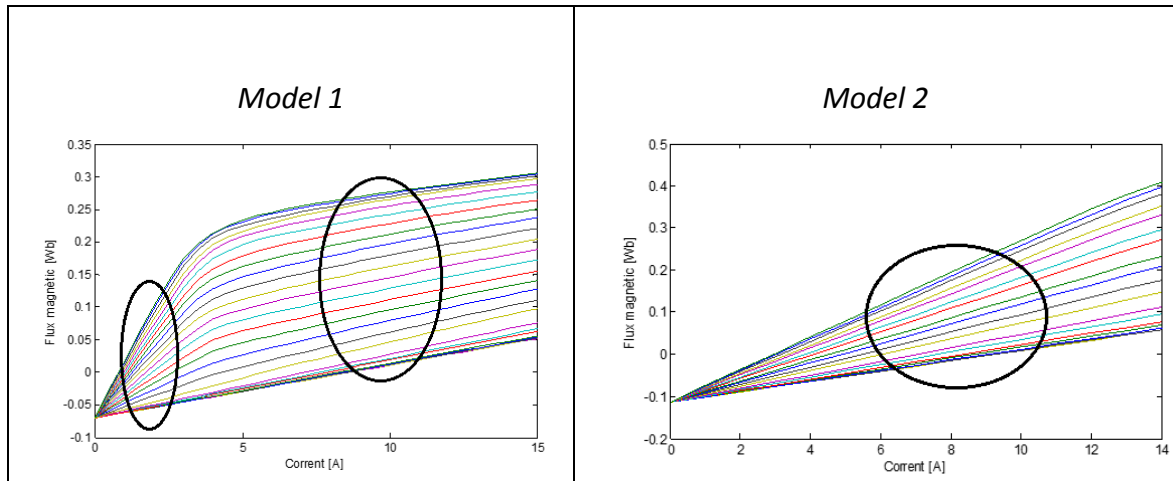
#### Comparativa entre models (I):

Veient els resultats obtinguts en l'anàlisi estàtic dels *models 1 i 2* podem veure que ambdós motors podran generar un parell més que digne, i per tant exercir una força de gir que serà suficient per acomplir la seva missió. Analitzant la forma d'ona de parell del *model 1* es pot

veure que hi ha un interval on el parell és manté pràcticament a zero, mentre que la del *model 2* aconseguix que si que hi hagi variació de flux en aquest interval d'angles, tot i no ser molt elevat i això fa que el parell s'allargui una mica més. Es pot veure a simple vista també que la forma d'ona del *model 2* s'assembla en alguns trams a les dents de serra cosa que no passa de forma tan accentuada en el *model 1*.

També destacar el fet que amb el *model 2* s'aconsegueix un flux magnètic una mica més elevat a mesura que s'injecta més corrent si es compara amb el *model 1*, i això pot donar joc a que hi hagi més variació d'aquest flux, i per tant generar més parell i de millor qualitat.

Pel que fa al gràfic de flux en funció del corrent podem veure una diferència notable en la forma que adopten les línies en funció de la posició del rotor del motor. Mentre que en el *model 1* podem veure com pugen amb dos trams de pendent diferenciats (com més corrent s'injecta més diferencia es veu entre aquestes dues pendents; al *model 2* es pot veure que el pendent no varia, per tant la relació flux-corrent és constant i no depèn de l'angle de la posició del rotor. Aquest fet és important ja que l'àrea que abasten aquestes línies que van de la posició alineada a la no alineada delimiten el cicle d'energia del motor i influeixen de forma directa en el seu comportament a l'hora de treballar:



**Taula 4. Gràfics de Flux Corrent on es veu la diferència que adopta el pendent en cada un dels dos models assajats.**

A continuació es procedirà a introduir millores en ambdós motors per veure si s'obtenen resultats més homogenis, i com influeixen aquests canvis en el seu comportament tot realitzant de nou els mateixos assaigs.

## 6.2. Anàlisi de les primeres variants

*Model 1, primera variant:*

Per a aquesta nova proposta, que té com a origen el *model 1*, s'ha optimitzat al màxim l'espai intern de l'estator. En primer lloc s'ha augmentat l'amplada dels pols, tant del rotor com de l'estator i per altra banda s'ha aprofitat al màxim l'espai dedicat als bobinats que envolten els pols de l'estator per a poder encabir més espires.

Com que el nombre d'espores que hi ha en un pol, juntament amb el corrent que circula per aquestes, influeix directament en la força magnetomotriu (fmm), s'assegurarà un millor resultat pel que fa al parell del motor.

$$Fmm = N \cdot I$$

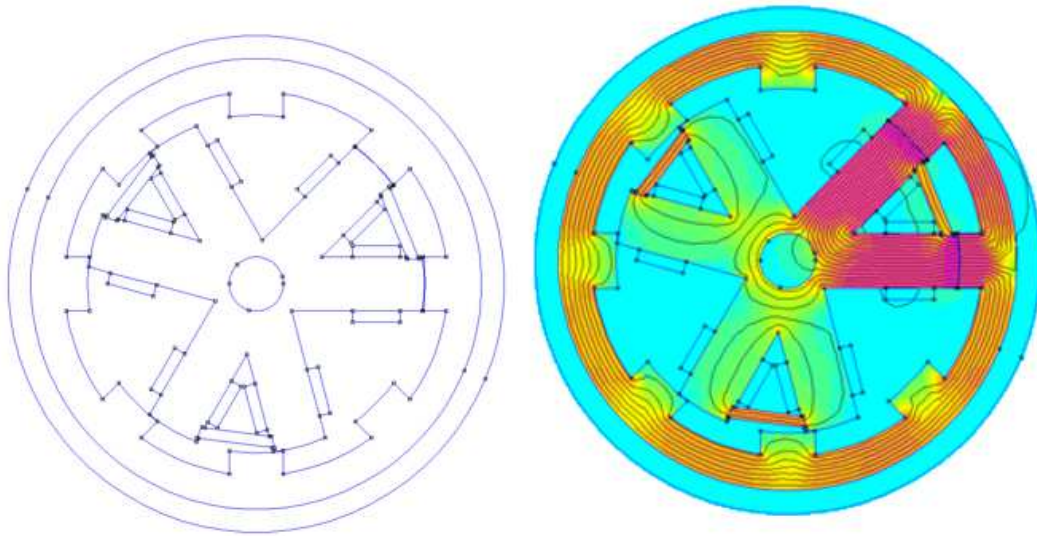
Així doncs, després d'haver realitzat tots aquests canvis en l'estructura la taula de característiques és la que segueix a continuació:

<b>Número de pols a l'estator</b>	6
<b>Número de pols al rotor</b>	8
<b>Número de fases</b>	3
<b>Diàmetre exterior</b>	220 mm
<b>Gruix general</b>	50 mm
<b>Amplada de pols del rotor</b>	24 mm
<b>Amplada de pols de l'estator</b>	24 mm
<b>Stroke (angle de pas)</b>	45°
<b>Nombre d'espores a cada pol</b>	150

**Taula 5. Característiques de la primera variant del model 1 de motor**

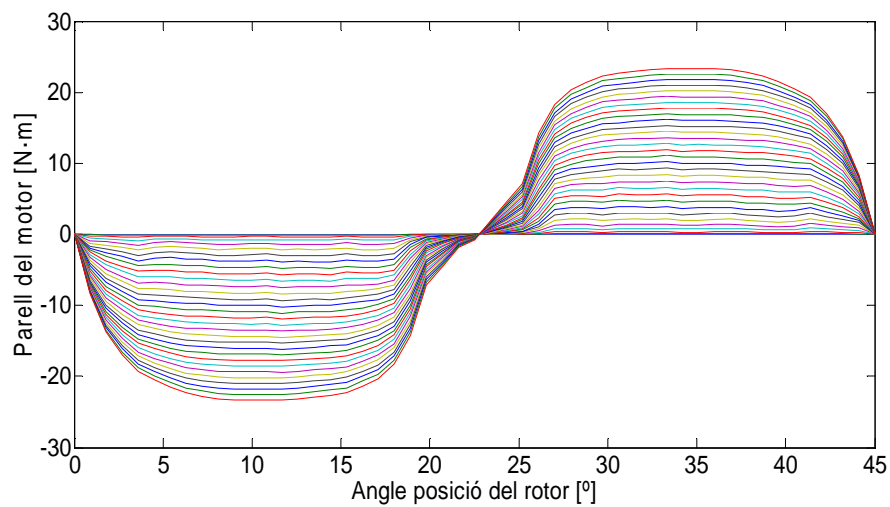


Amb la següent forma geomètrica i l'anàlisi corresponent al programa FEMM:



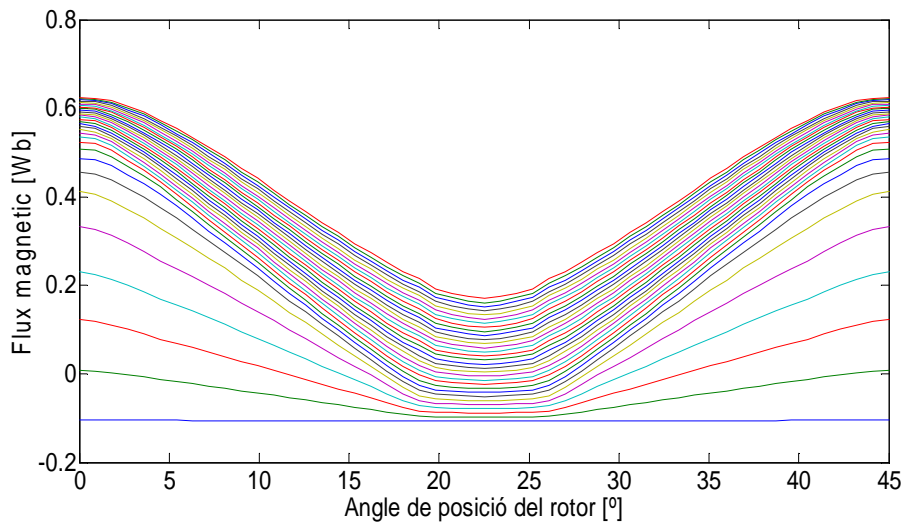
**Il·lustració 25.** Esquerra; dibuix de la primera variant del model 1.  
Dreta; anàlisi de l'estructura mitjançant el programa FEMM

Els resultats que s'han obtingut de l'anàlisi estàtic són els següents:

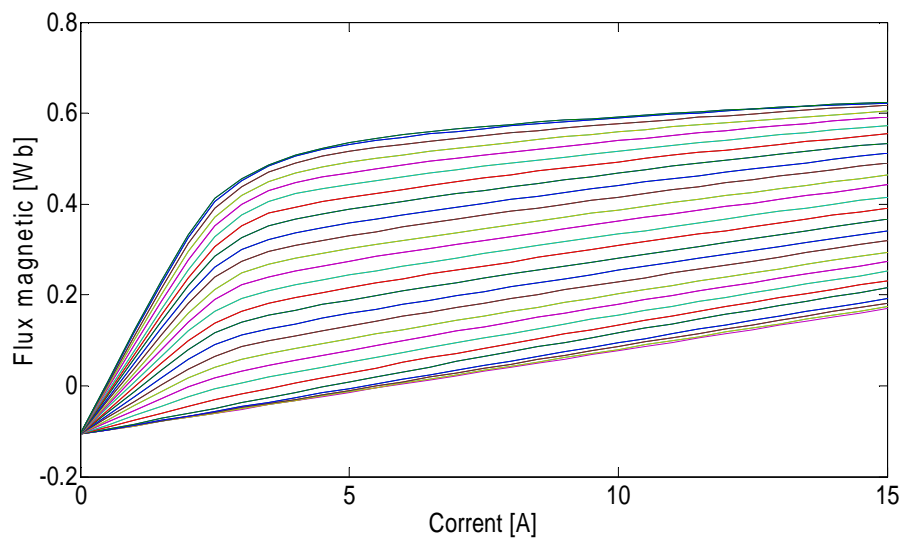


**Gràfica 7.** Primera variant model 1: Representació del parell segons l'angle de posició del rotor i per a cada corrent determinat a l'ANNEX B





**Gràfica 8. Primera variant model 1: Representació del flux segons l'angle de posició del rotor i per a cada corrent determinat a l'ANNEX B**

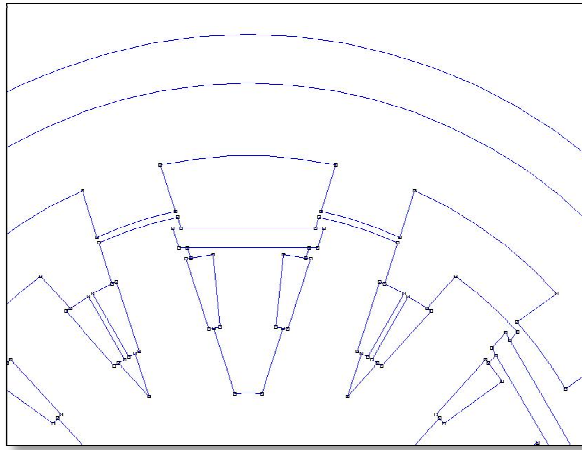


**Gràfica 9. Primera variant model 1: Representació del flux segons el corrent i per a cada angle determinat a l'ANNEX B**

Es pot observar en els gràfics com el parell ha augmentat de forma clara i s'ha uniformitzat molt més la forma de la seva ona. També com el flux ha aconseguit una major variabilitat i durant més temps (cosa que afecta directament al parell resultant) i la gràfica de flux-corrent ha augmentat la seva àrea pel que fa a la posició alineada fins a la no alineada.

### Model 2, primera variant:

Els canvis que s'introdueixen a aquesta estructura de fases dobles van en la mateixa direcció que en el cas anterior. Es vol aprofitar al màxim l'espai de l'estator i generar el màxim benefici possible. Per a fer-ho les accions que s'han dut a terme han sigut: engrandir l'amplada dels pols (tant del rotor com de l'estator), però s'han hagut de fer un mil·límetre més estrets per banda a la part de l'estator per a poder-hi encabir un nombre d'espises igual al de l'assaig anterior, ja que la zona dedicada a tal efecte es veia reduïda a l'eixamplar els pols. Amb aquesta proposta es vol reduir l'efecte de les dents de serra observat en el gràfic de la corba de parell del *model 2* i veure si s'aconsegueix augmentar-lo gràcies a una major variació de flux.



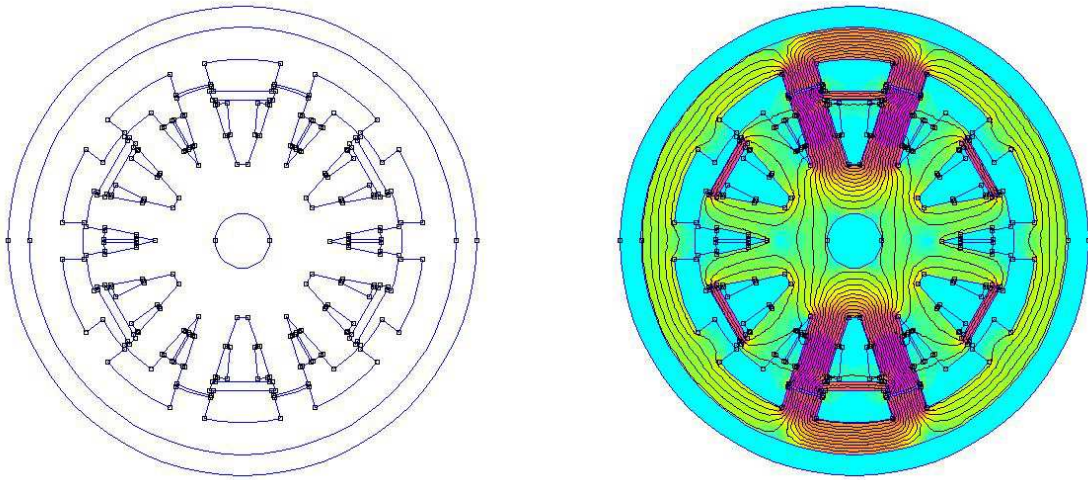
Il·lustració 26. Detall dels pols de l'estator en posició alineada, on es veu la forma de l'iman, l'espai dedicat als bobinats i la nova amplada dels pols.

La taula de característiques de la figura assajada és la següent:

Número de pols estator	12
Número de pols rotor	10
Número de fases	3
Diàmetre exterior	220 mm
Gruix general	50 mm
Amplada de pols del rotor	17
Amplada de pols de l'estator	17
Stroke	36°
Nombre d'espises a cada pol	100

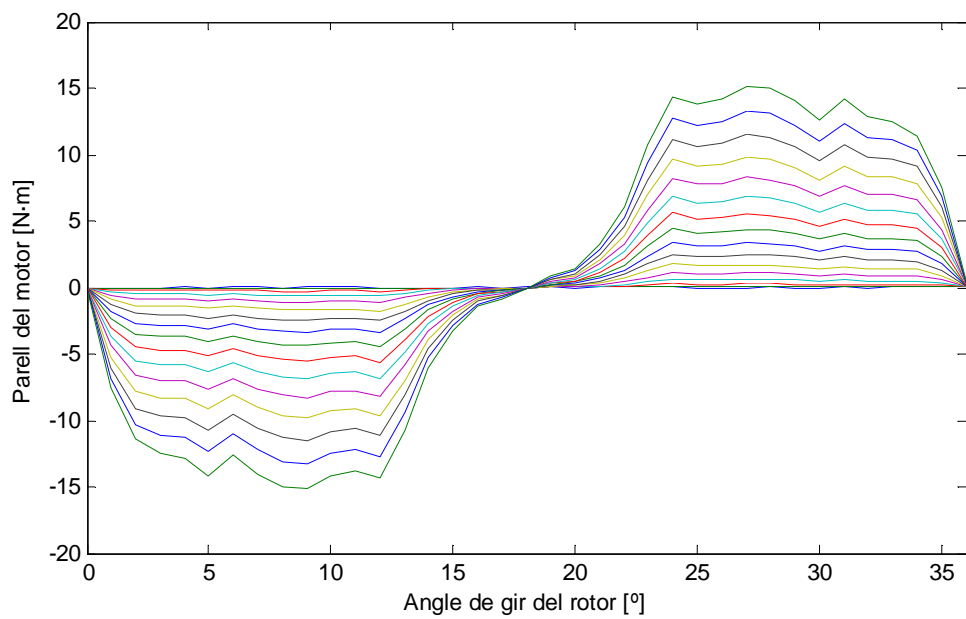
Taula 6. Característiques de la primera variant del model 2

I la següent forma geomètrica i l'anàlisi corresponent al programa FEMM:

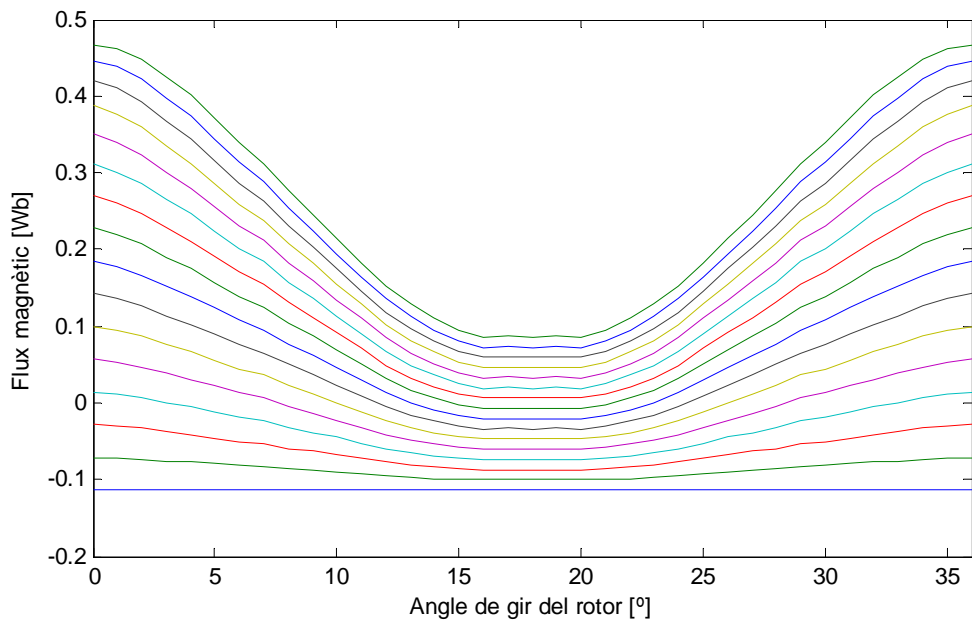


**Il·lustració 27.** Esquerra; dibuix del prototip de partida per a roda gran.  
Dreta; anàlisi de l'estructura mitjançant el programa FEMM

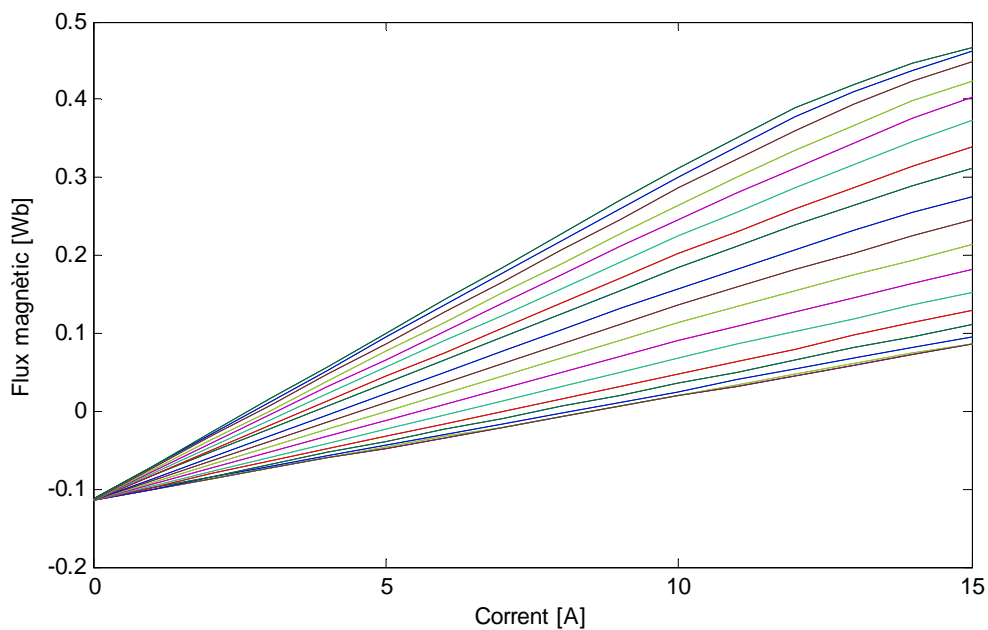
Els resultats que s'han obtingut de l'anàlisi estàtic són els següents:



**Gràfica 10.** Primera variant Model 2: Representació del parell segons l'angle de posició del rotor i per a cada corrent determinat a l'ANNEX B



**Gràfica 11. Primera variant Model 2: Representació del flux segons l'angle de posició del rotor i per a cada corrent determinat a l'ANNEX B**

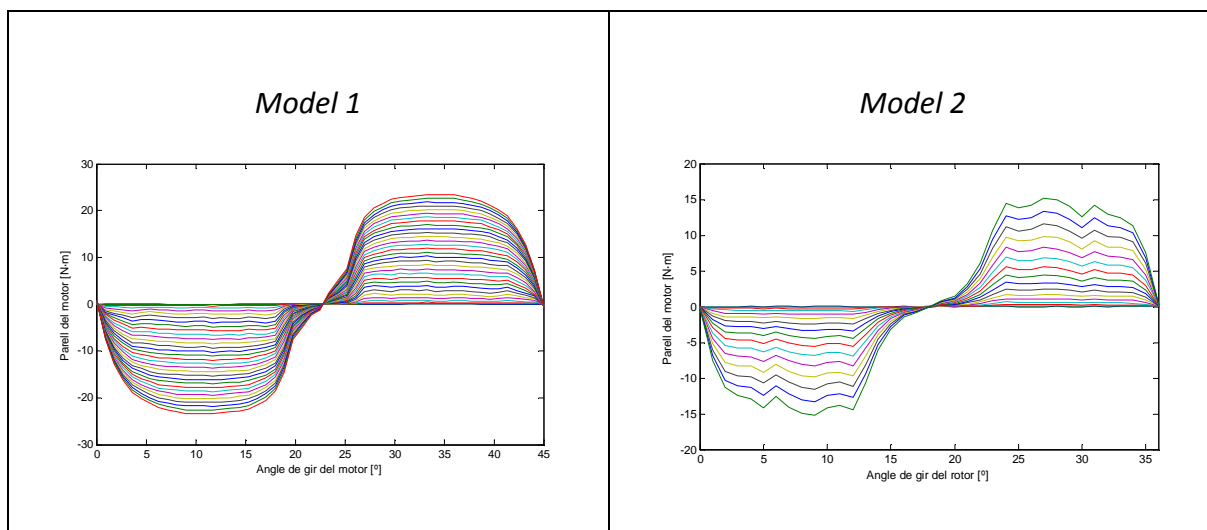


**Gràfica 12. Primera variant Model 2: Representació del flux segons el corrent i per a cada angle determinat a l'ANNEX B**

Es pot observar una clara millora pel que fa a la forma de l'ona de parell respecte al model 2 que és deguda a la major variabilitat del flux en corrents més elevats. El seu màxim però, no despenja gaire del seu model de partida, i s'haurà de fer alguna altre modificació si es vol augmentar de forma clara el parell que generi el motor.

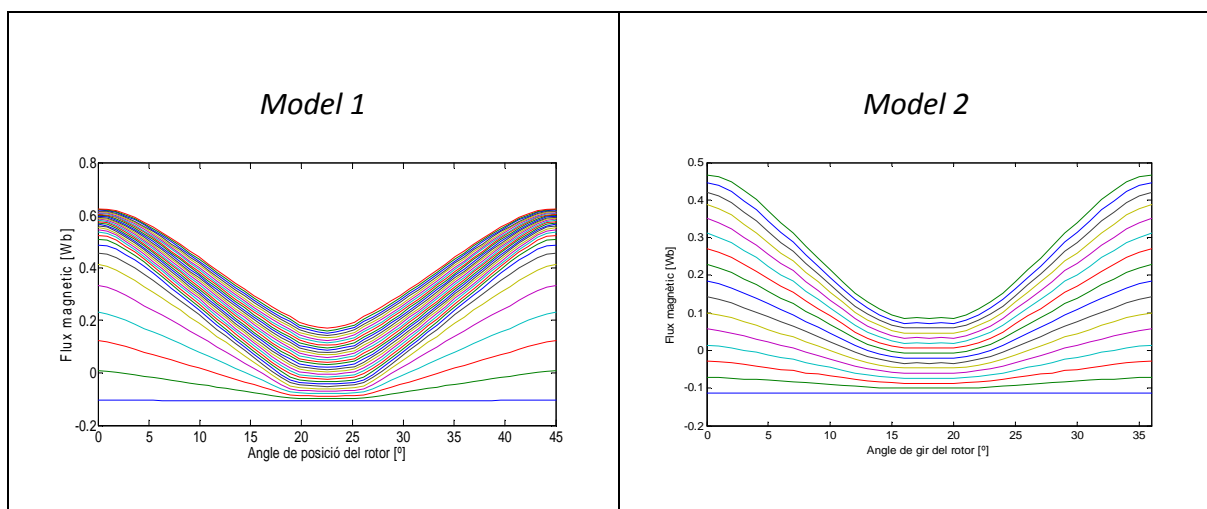
## Comparativa entre models (II)

Amb les modificacions aplicades en el *model 1* podem veure com s'ha aconseguit una forma d'ona molt més homogènia i regular, sense pics ni dents de serra. En canvi, amb les modificacions del *model 2*, no s'ha aconseguit evitar aquests pics i la forma d'ona no és tan rodona. A banda d'això, el parell màxim en el primer model aconsegueix arribar fins a 24 Nm i en el segon cas arriba als 15 Nm .



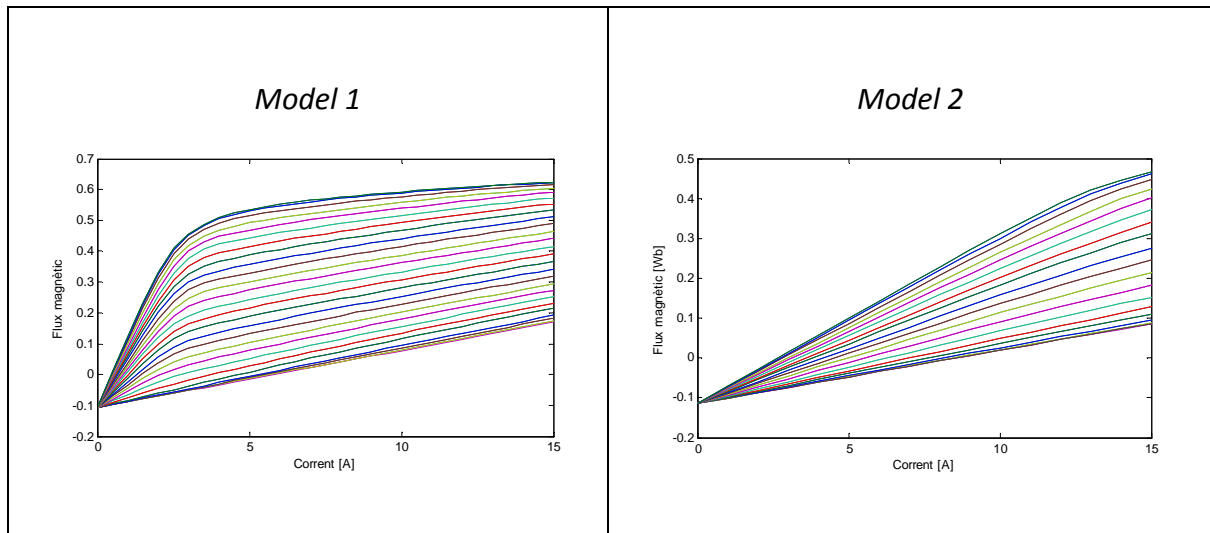
Taula 7. Gràfics de la forma d'ona de parell que adopta segons el model 1 o el model 2.

També s'ha pogut observar com en la gràfica de flux en funció de l'angle de gir del rotor, a major corrent major serà la variació del flux, i aquest fet és més accentuat en el *model 1* que al *model 2*, cosa que causa que en el primer s'aconsegueixi més parell en injectar diferents corrents.



Taula 8. Gràfics de la relació flux-angle de posició en funció del corrent que adopta segons el model 1 o el model 2.

Per últim si es comparen les dues gràfiques que mostren la relació de flux i corrent per a cada un dels angles de posició del rotor entre la posició alineada i la no alineada dels pols podem veure també diferències pel que fa a l'àrea que ocupen les línies que indiquen l'angle de posició del rotor. Això indica que el *model 1* segueix tenint una superfície major i per tant segueix sent més favorable per a funcionar com a motor i com a generador:



**Taula 9. Gràfics de la relació flux-corrent de posició en funció de la posició del rotor segons el model 1 o el model 2.**

Com a conclusions, les modificacions aplicades en ambdós casos ens donen millors resultats que ens els models de partida però en el *model 2* es queden encara lluny del que es desitja, i per tant s'hauran de seguir fent modificacions si volem que el parell d'aquest motor s'acosti al que podrà desenvolupar el *model 1*. Pel que fa al model 1, podem veure que la seva estructura és una mica dèbil al centre de la figura, ja que l'espai entre naixement dels pols de l'estator i l'eix és molt petit i això pot representar que la seva estructura no aguantí les sotragades ni les vibracions i s'acabi trencant.

Així doncs, es procedirà a fer noves modificacions en les dues figures.

### 6.3. Anàlisi de les segones variants

*Model 1, segona variant:*

Com que aquesta figura comença a donar ja resultats força òptims, aquestes noves millores aplicades s'han centrat en millorar la seva estructura tot augmentant la distància entre l'inici dels pols de l'estator i l'eix, així es reforça el seu encaix i s'assegura que resistirà els impactes

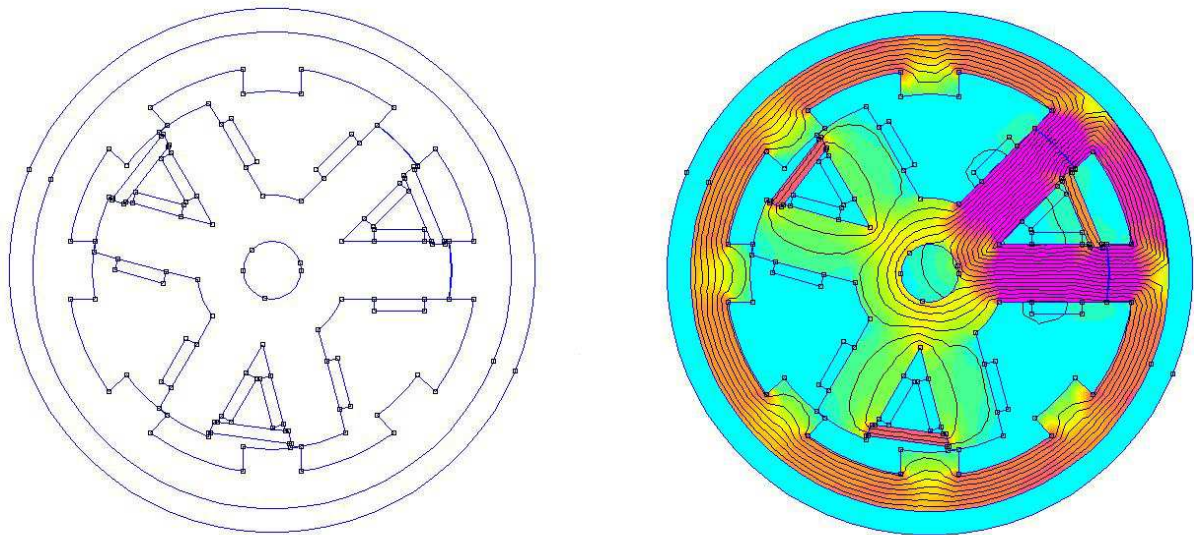
provocats per la roda de la bicicleta en un desplaçament que no sigui del tot suau i mirarà d'absorbir millor les vibracions.

La taula de característiques doncs, es manté idèntica a la variant 1 d'aquest primer model assajat:

<b>Número de pols a l'estator</b>	6
<b>Número de pols al rotor</b>	8
<b>Número de fases</b>	3
<b>Diàmetre exterior</b>	220 mm
<b>Gruix general</b>	50 mm
<b>Amplada de pols del rotor</b>	24 mm
<b>Amplada de pols de l'estator</b>	24 mm
<b>Stroke (angle de pas)</b>	45°
<b>Nombre d'espires a cada pol</b>	150

Taula 10. Característiques de la segona variant del model 1 de motor

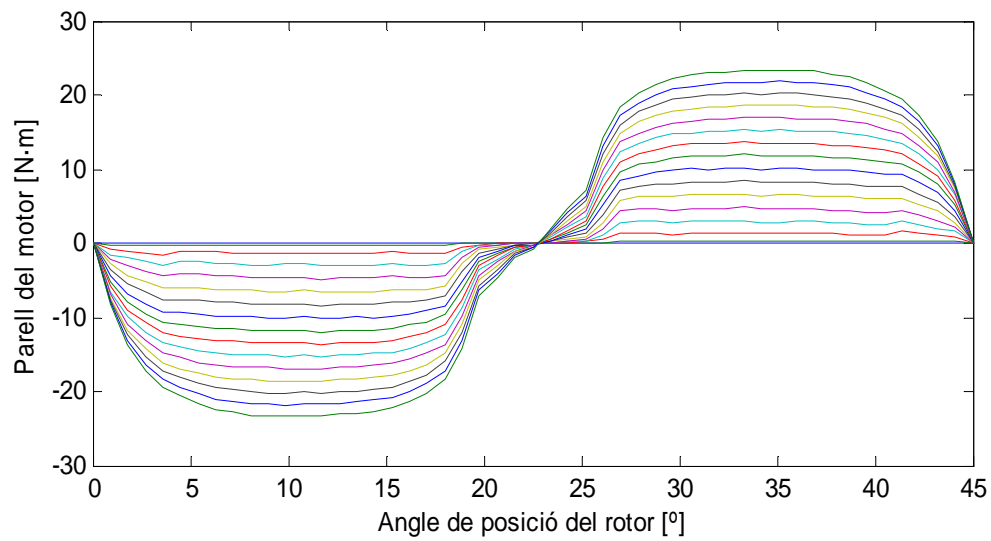
La seva nova forma geomètrica quedarà doncs de la següent manera:



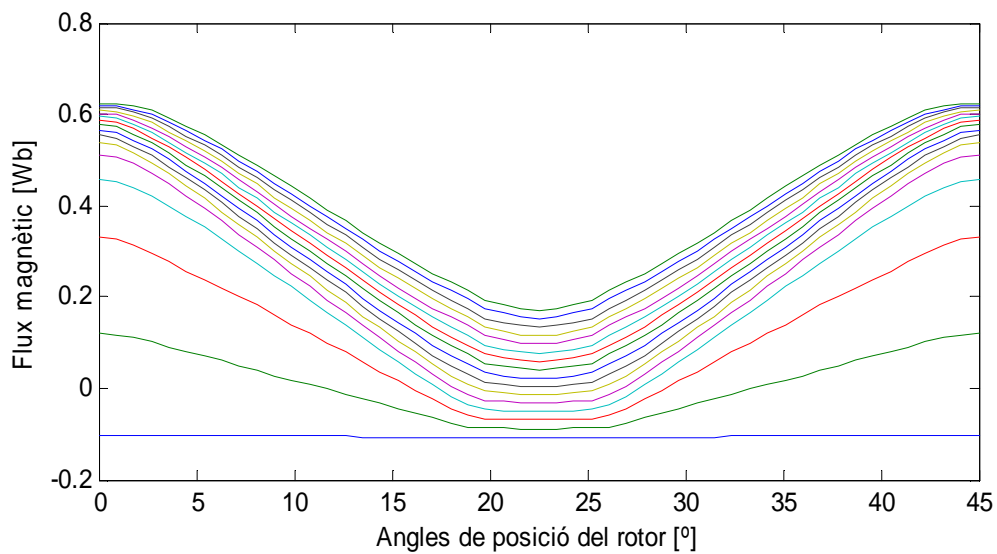
Il·lustració 28. Esquerra; dibuix de la variant 2 del model 1. Dreta; anàlisi de l'estructura mitjançant el programa FEMM



Pel que fa als resultats de l'anàlisi estàtic d'aquesta nova variant, no hi ha hagut sorpreses i s'assemblen molt als resultats obtinguts amb la primera variant:

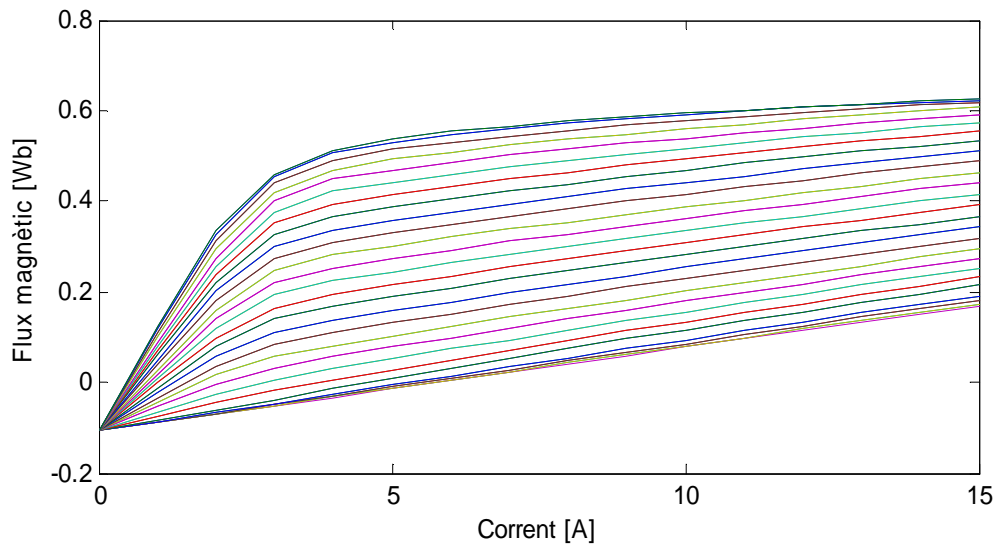


**Gràfica 13. Segona variant Model 1: Representació del parell segons l'angle de posició del rotor i per a cada corrent determinat a l'ANNEX B**



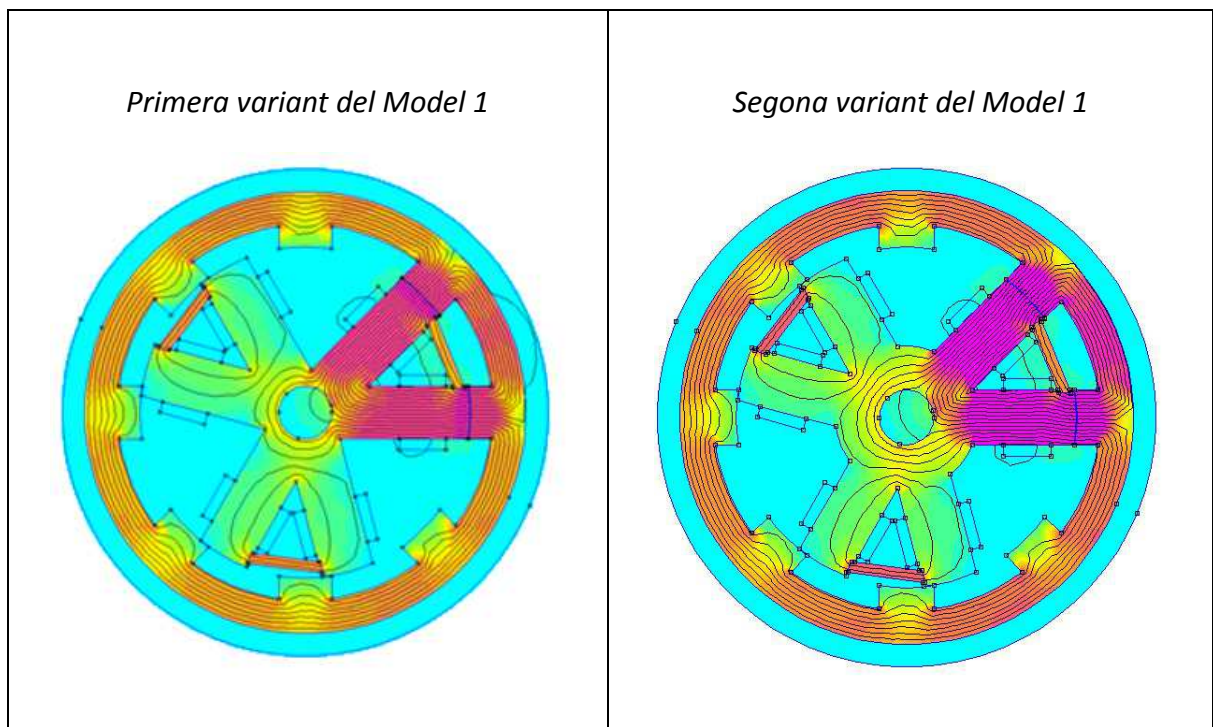
**Gràfica 14. Segona variant Model 1: Representació del flux segons l'angle de posició del rotor i per a cada corrent determinat a l'ANNEX B**





Gràfica 15. Segona variant Model 1: Representació del flux segons el corrent i per a cada angle determinat a l'ANNEX B

Amb les modificacions aplicades s'ha aconseguit mantenir estables els resultats obtinguts i reforçar notablement l'estructura del motor, ja que ara, amb un entorn de l'eix més gruixut s'assegurarà que el motor podrà resistir impactes sense veure's perjudicat ja que la seva estructura ha deixat de ser tan fràgil com ho era abans:



Taula 11. Comparativa entre les variants 1 i 2 del model 1 on s'ha reforçat l'estructura interna de l'estator.

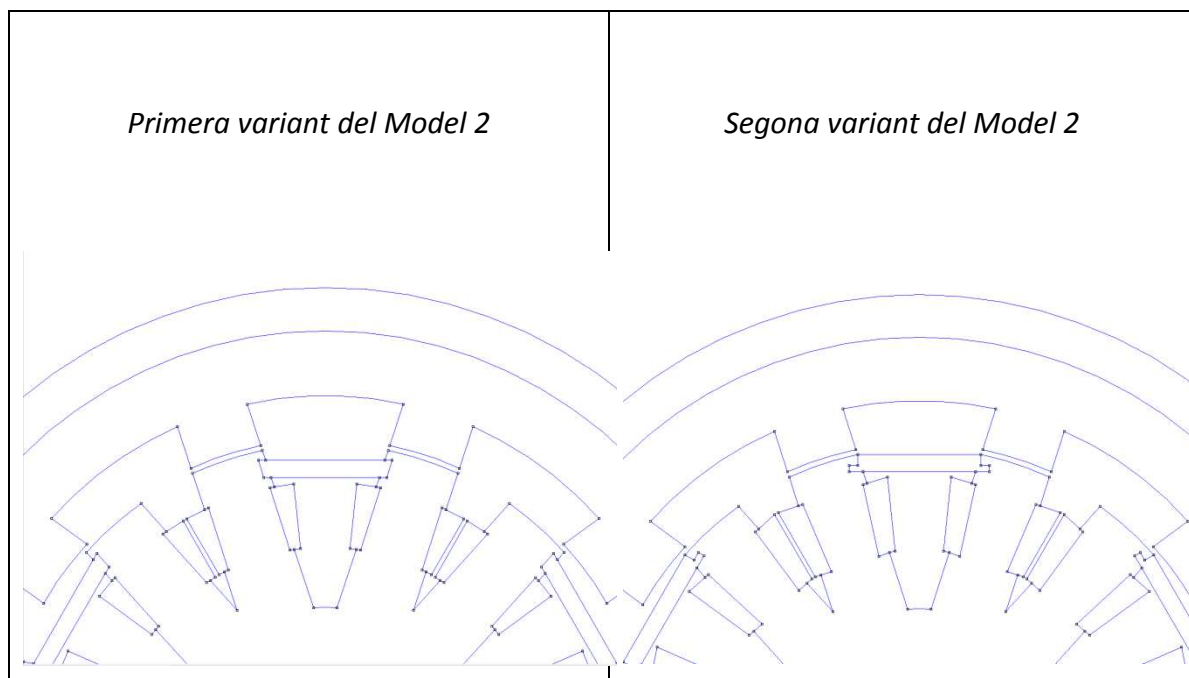
### *Model 2, segona variant:*

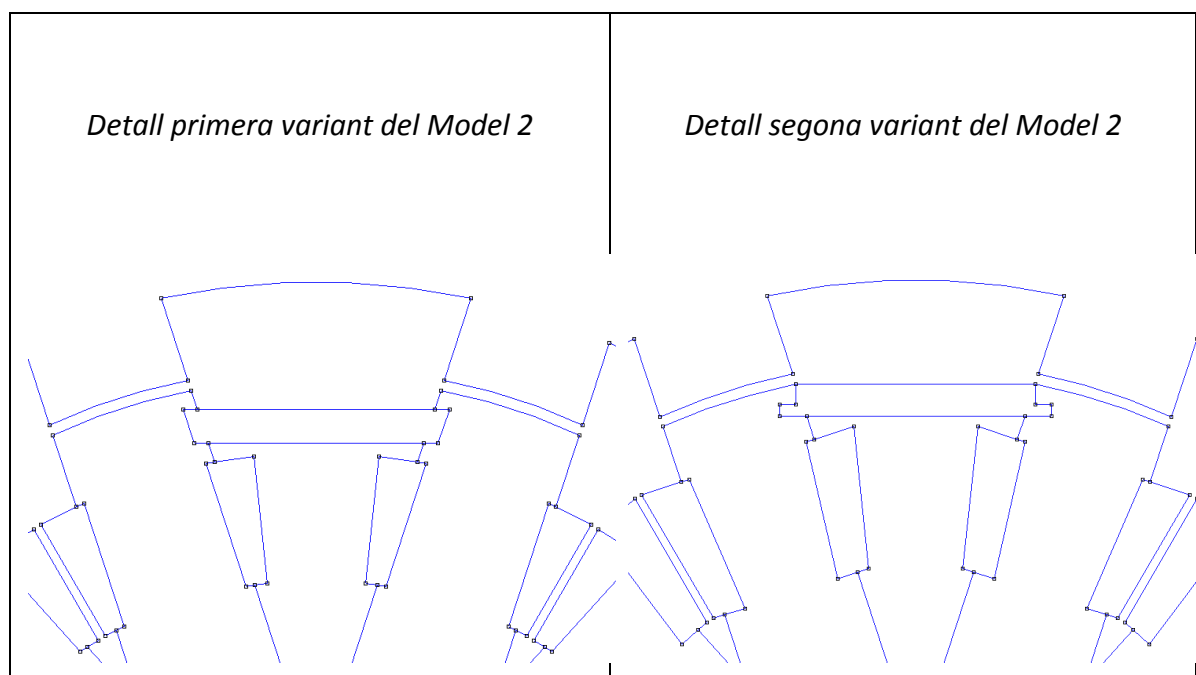
En aquest models s'han introduït molts canvis ja que es vol que aquest disseny de motor s'assembli al màxim, en quant a resultats, al desenvolupat mitjançant les noves variants constructives que deriven del model 1.

Per assolir aquest objectiu, el primer que s'ha fet ha sigut, mantenint l'amplada dels pols tant del rotor com de l'estator, desplaçar els imants fins a acostar-los el màxim possible als pols del rotor, cosa que ha comportat una modificació en el seu disseny. Amb aquesta mesura s'aconsegueix alliberar espai al voltant dels pols de l'estator per a encabir-hi més espires.

Amb aquest mateix propòsit, s'ha fet també, com en la variant anterior, la part externa dels pols de l'estator més estreta, però no de forma uniforme com abans, sinó que com més s'allunyen les espires dels pols del rotor més profunda s'ha fet la cavitat per a encabir-les. S'ha anat en compte de no sobrepassar-se a l'hora de fer aquesta darrera modificació ja que un excés de ranures i un pol massa estret podria provocar una saturació del corrent i que aquest ja no provoqués suficient força electromotriu.

Gracies a això el nombre d'espores que es podran introduir al motor serà de 130, que tot i no ser les 150 que té el model 1 ja és un nombre que s'acosta més al seu ordre de magnitud.





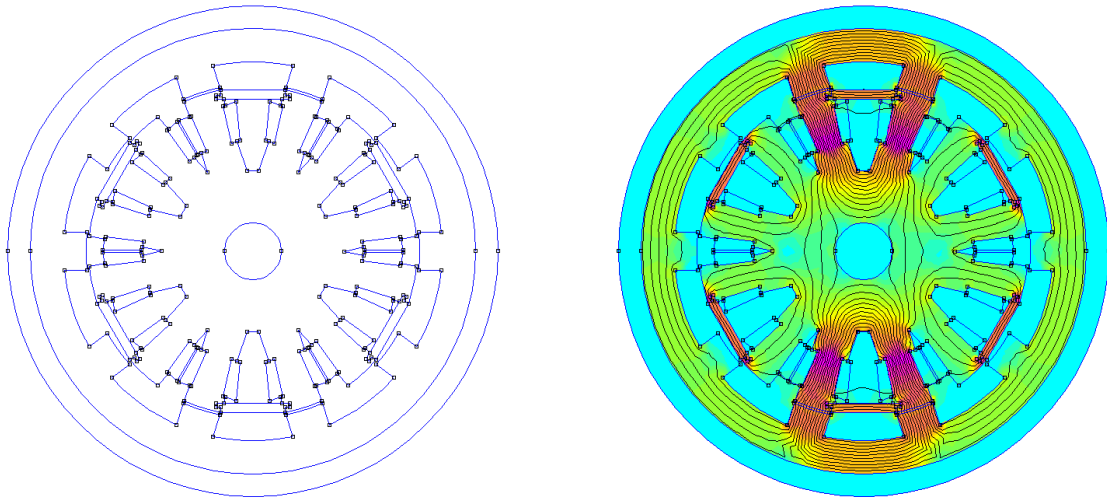
Taula 12. Comparativa entre les variants 1 i 2 del model 2, on s'observa l'acostament dels imants cap als pols del rotor, i la nova forma que adopta l'àrea dedicada a les espirals de les bobines del rotor.

Així doncs, les variables constructives del model que s'estudia queden de la següent forma:

<b>Número de pols estator</b>	12
<b>Número de pols rotor</b>	10
<b>Número de fases</b>	3
<b>Diàmetre exterior</b>	220 mm
<b>Gruix general</b>	50 mm
<b>Amplada de pols del rotor</b>	17
<b>Amplada de pols de l'estator</b>	17
<b>Stroke</b>	36°
<b>Nombre d'espires a cada pol</b>	130

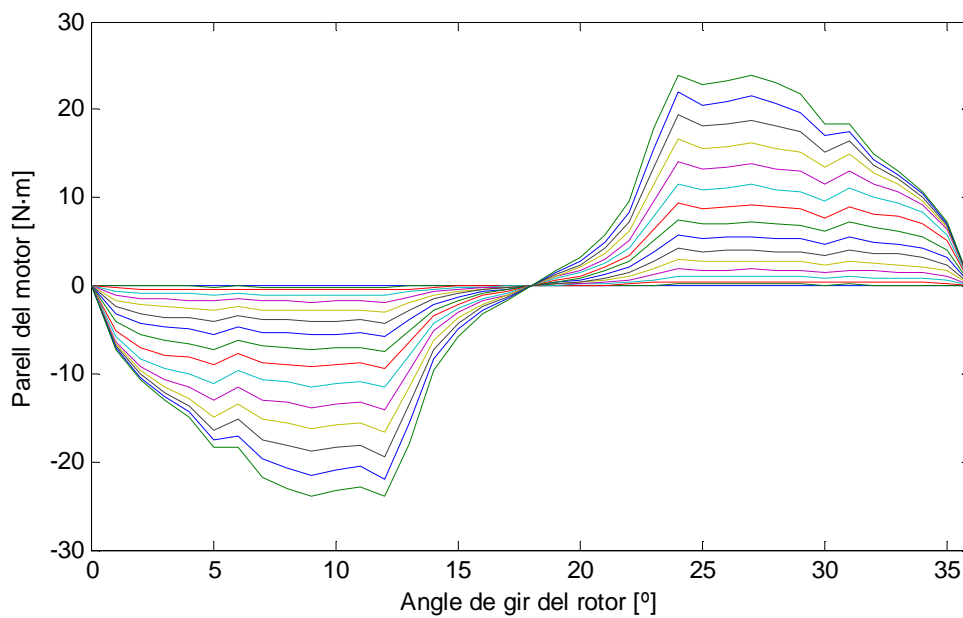
Taula 13. Característiques de la segona variant del model 2 de motor

I la seva forma geomètrica i anàlisi després de les modificacions és:

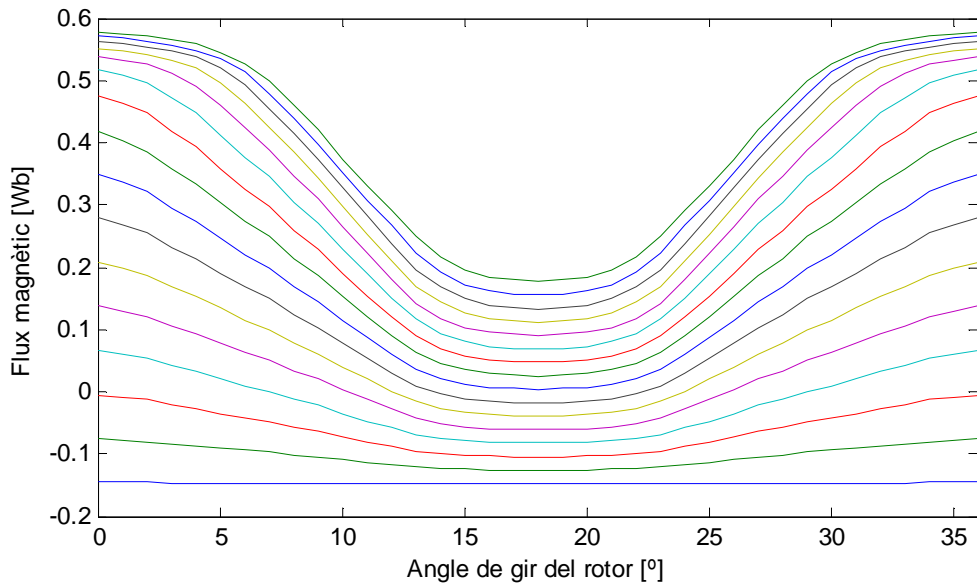


**Il·lustració 29.** Esquerra; dibuix de la variant 2 del model 2.  
Dreta; anàlisi de l'estructura mitjançant el programa FEMM

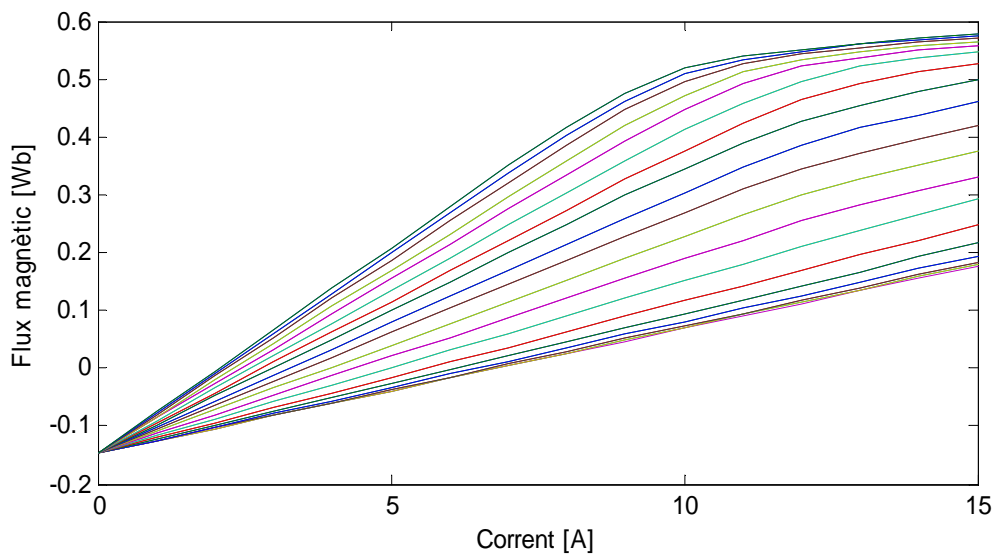
Això dona lloc als següents resultats obtinguts de l'anàlisi estàtic:



**Gràfica 16.** Segona variant Model 2: Representació del parell segons l'angle de posició del rotor i per a cada corrent determinat a l'ANNEX B



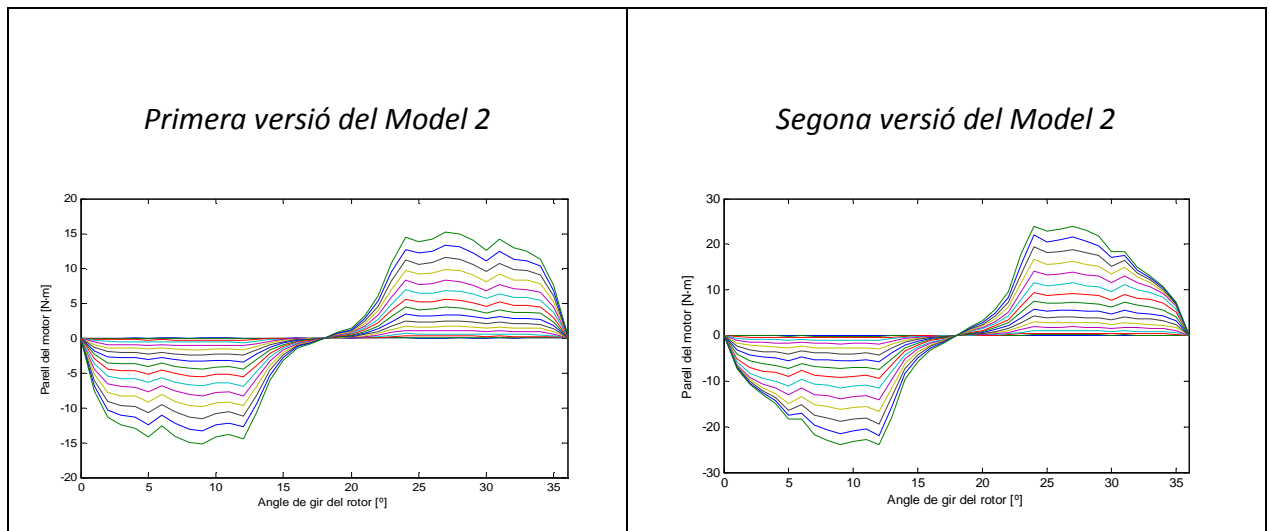
Gràfica 17. Segona variant Model 2: Representació del flux segons l'angle de posició del rotor i per a cada corrent determinat a l'ANNEX B



Gràfica 18. Segona variant Model 1: Representació del flux segons el corrent i per a cada angle determinat a l'ANNEX B

Com es pot veure als gràfics que s'han obtingut de l'anàlisi estàtic, amb aquestes modificacions s'ha aconseguit que el parell que és capaç de generar el motor hagi augmentat de forma notòria.

També s'ha volgut suavitzar aquesta gràfica de parell, però no s'ha aconseguit ja que com es pot veure a continuació, si comparem les gràfiques de les ones de parell de les versions primera i segona d'aquest *Model 2*, es pot observar clarament que tot i tenir un parell màxim més elevat, en la segona versió, aquest no és tant constant. Es fa palès també que aquest fenomen s'accentua quan major és el corrent injectat i per tant tindrà conseqüències en el funcionament global del motor.



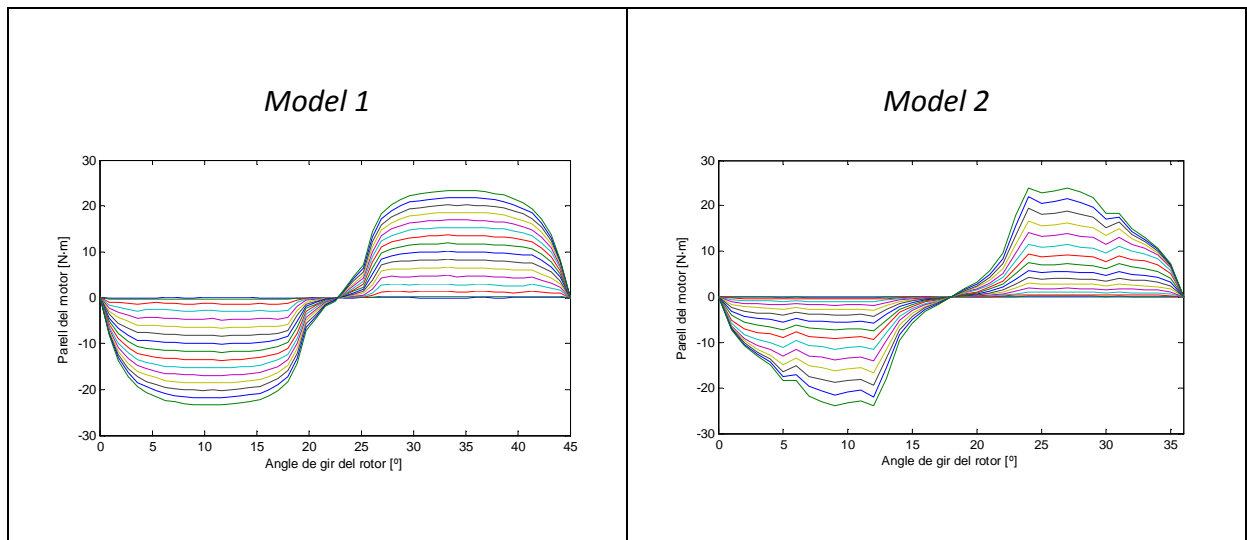
**Taula 14.** Gràfics de la forma d'ona de parell que adopta la primera versió (esquerra) i la segona versió (dreta).

Aquesta nova té un major grau de similitud amb la darrera versió del *Model 1*, i això fa que es puguin comparar en ordre de magnitud i extreure'n conclusions.

### *Comparativa entre models (III)*

L'evolució dels *models 1 i 2* de motor HRM ens ha portat a obtenir dos dissenys de motors clarament diferenciats i que ofereixen diferents possibilitats.

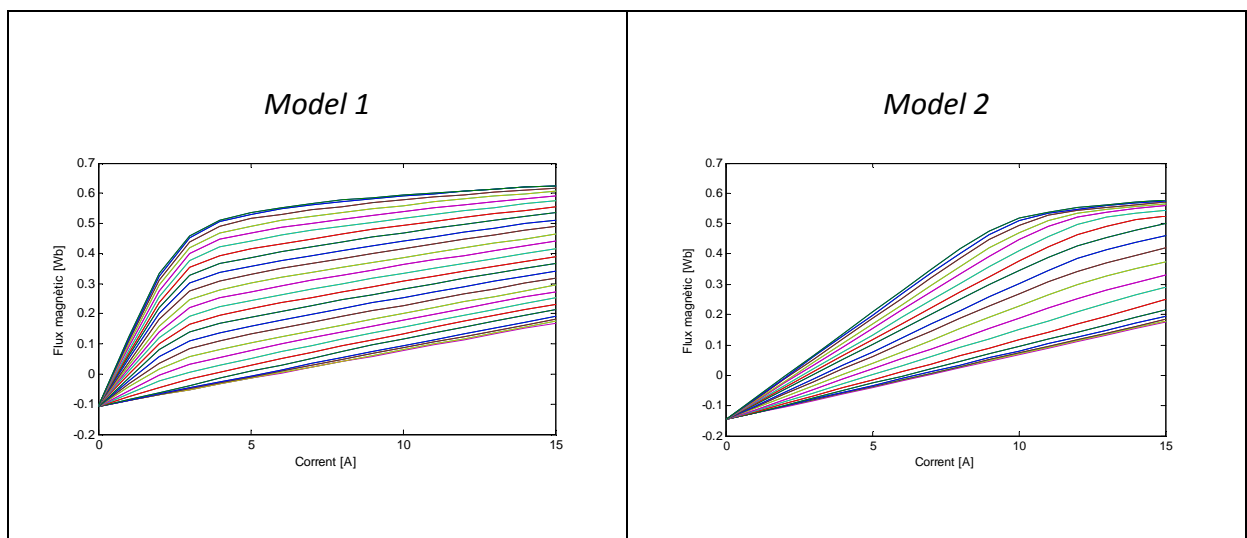
A l'observar la corba de parell de ambdós models podem veure com clarament el *Model 1* aconsegueix una forma més 'rodona' i homogènia, mentre que en la darrera versió del *Model 2* podem veure que tot i tenir una forma d'ona no gaire diferent i un parell màxim similar, aquesta no aconsegueix evitar els pics i les zones de parell constant son clarament menors.



Taula 15. Gràfics de la forma d'ona de parell que adopta segons el model 1 o el model 2.

Pel que fa al flux que es genera entre les posicions alineada i no alineada del motor, es pot veure de forma clara al gràfic que la zona que ocupen aquestes línies és diferent en els dos casos, i per tant, com major és la zona que ocupen, més treball es generarà entre aquestes dues posicions del motor.

Així doncs, el *Model 1* és el més indicat per a obtenir un millor rendiment i unes millors prestacions, ja que té una forma d'ona de parell més estable i una àrea de treball més gran entre les posicions alineada i no alineada dels pols del motor.



Taula 16. Gràfics de la relació flux-corrent de posició en funció de la posició del rotor segons el model 1 o el model 2.

Des d'un altre punt de vista, i deixant els gràfics a banda, el que es busca amb el Model 2 és aportar una sèrie de beneficis gens menyspreables per al bon funcionament del motor. L'estructura de fases dobles permet fer un repartiment de la força magnetomotriu entre les dues fases que estaran activades en un moment determinat. Aquest fet, permetrà reduir de forma clara el soroll que fa el motor durant el seu funcionament, i també les vibracions causades pel fet de tenir només activa una sola fase i que no es vegi compensada de cap manera.

Per altre banda la nova variant constructiva del *Model 2* té un inconvenient destacable, el seu procés productiu és més car. Això és degut a que el fet d'estrènyer els pols de l'estator per encabir més bobines provoca que la inserció d'aquest bobinat no es pugui fer de forma industrialitzada, sinó que s'haurà d'enroscar el coure de forma manual. Les conseqüències d'aquest fet són clares, s'alenteix el procés de fabricació del motor i per tant s'encareix.

Com a conclusions es pot afirmar que, després d'un desenvolupament favorable en dos models amb dues estructures clarament diferenciades, s'ha arribat a un punt on es veu de forma clara que un model aporta majors beneficis en quant a funcionament, resultats i costos que l'altre.

Encara es poden fer més modificacions en ambdós models, però es preveu que la tendència es mantingui i que el *Model 1* segueixi sent més avantatjós. No s'oblida que el *Model 2* aporta també grans beneficis i que pot acomplir de forma perfecta la funció de motor, però el fet de tenir una zona de treball tan minsa i fa indicar que com a generador no seria capaç de proporcionar allò que es requereix per a poder recarregar la bateria del sistema.

#### 6.4. Variació de la profunditat del motor

Per a la realització d'aquest estudi s'ha decidit treballar només amb un dels dos models desenvolupats, ja que l'efecte que té la variació de la profunditat del motor sobre el comportament del mateix és extrapolable d'un model a l'altre.

La finalitat d'aquest és veure com afecta l'augment del gruix del motor, i per a fer-ho s'ha treballat a partir de la tercera variant del *Model 1*.

Un cop realitzat es podrà concloure si l'increment de pes, de volum i de material en definitiva que ha comportat aquest augment de la profunditat del motor, es veu compensat amb les millores que pugui donar, o no, el nou disseny de motor.



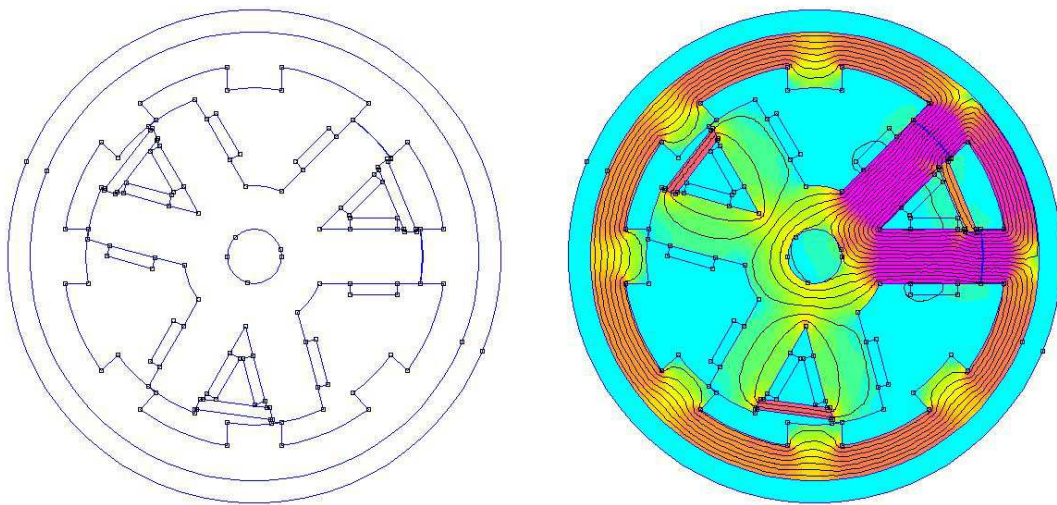
### Tercera variant Model 1

Així doncs, s'ha ampliat la profunditat de la figura 20 mm, ja que és el màxim espai del que es disposarà dins la carcassa del motor. La taula de característiques d'aquest és doncs:

<b>Número de pols a l'estator</b>	6
<b>Número de pols al rotor</b>	8
<b>Número de fases</b>	3
<b>Diàmetre exterior</b>	220 mm
<b>Gruix general</b>	70 mm
<b>Amplada de pols del rotor</b>	24 mm
<b>Amplada de pols de l'estator</b>	24 mm
<b>Stroke (angle de pas)</b>	45°
<b>Nombre d'espises a cada pol</b>	150

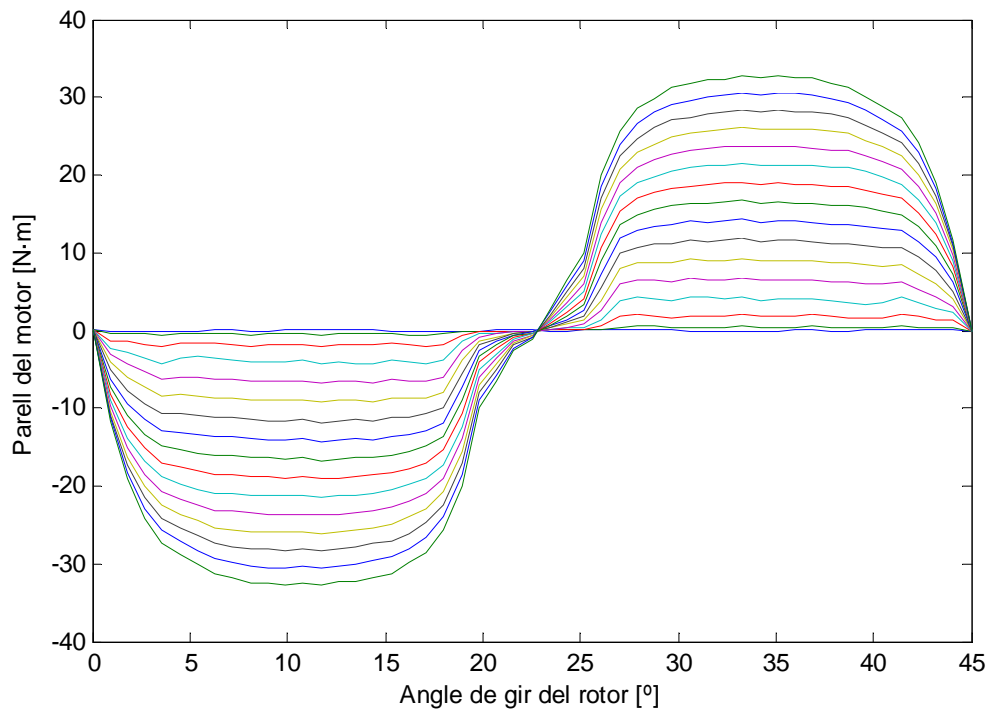
Taula 17. Característiques de la tercera variant del model 1 amb major profunditat

Així doncs, la seva forma geomètrica i anàlisi és:

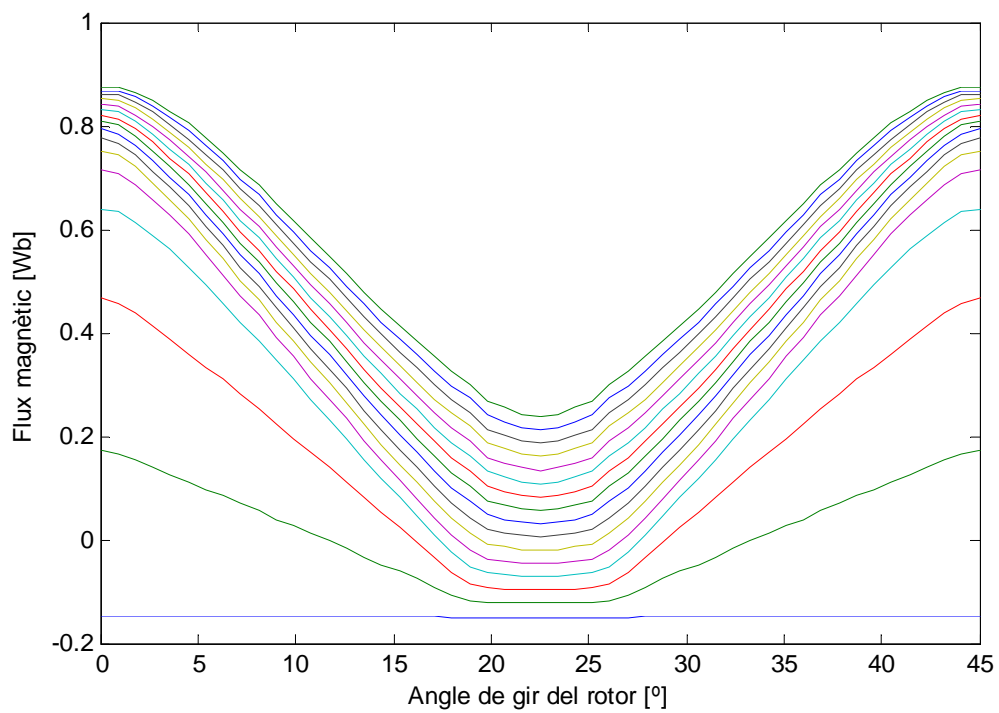


Il·lustració 30. Esquerra; dibuix de la tercera variant del model 1.  
Dreta; anàlisi de l'estructura mitjançant el programa FEMM

I els resultats obtinguts de l'anàlisi estàtic:

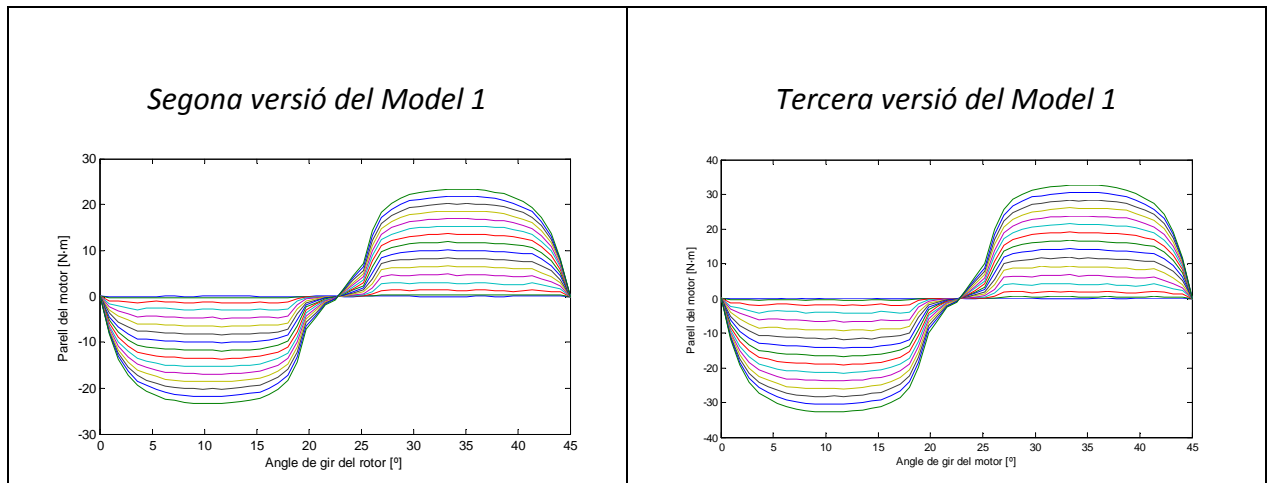


Gràfica 19. Tercera variant del Model 1: Representació del parell segons l'angle de posició del rotor i per a cada corrent determinat a l'ANNEX B



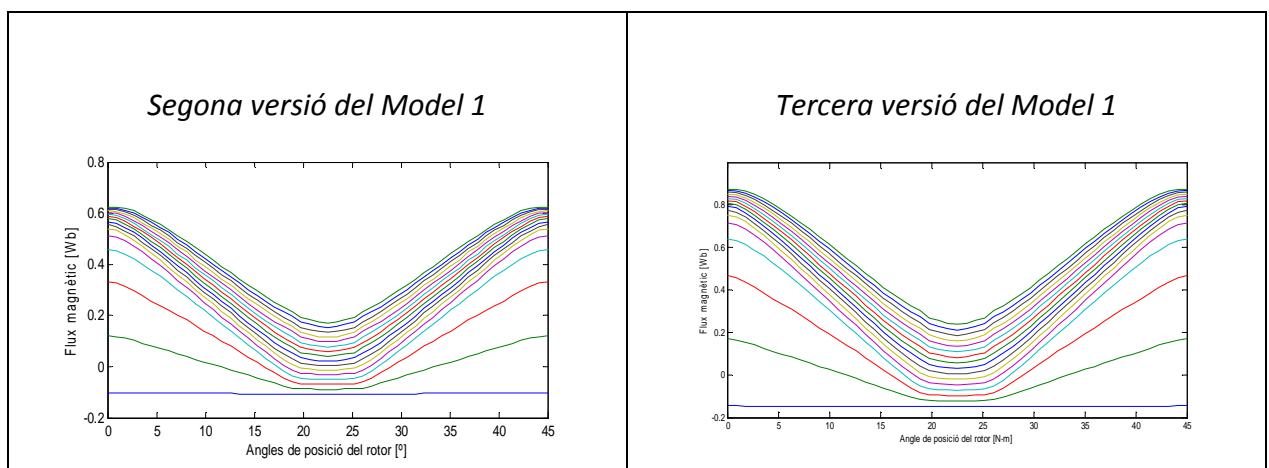
Gràfica 20. Tercera variant del Model 2: Representació del flux segons l'angle de posició del rotor i per a cada corrent determinat a l'ANNEX B

Fent un anàlisi dels resultats obtinguts, es pot veure clarament com el fet d'augmentar l'amplada del motor afecta directament al parell que aquest genera. Així doncs, al incrementar 20 mm l'amplada del motor, s'ha aconseguit mantenir la forma de l'ona de parell del motor i a més incrementar el seu rendiment. Per tant, al guanyar profunditat s'ha guanyat parell.



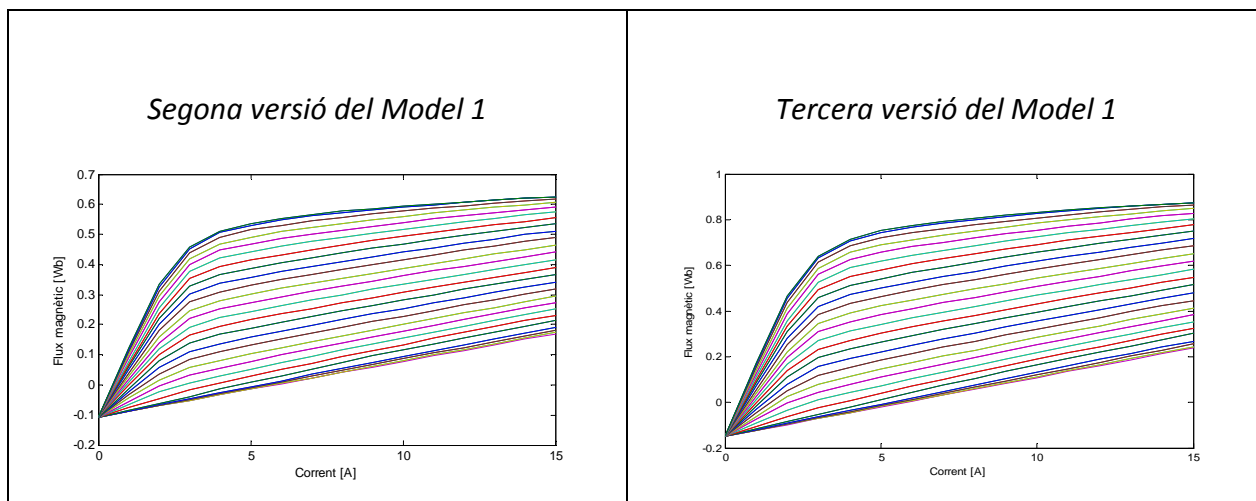
**Taula 18.** Gràfics de la forma d'ona de parell que adopta segons el model 1 o el model 2.

Com es pot veure a continuació, la variació del flux ha augmentat fent aquesta modificació, i per tant el parell que genera aquest és clarament superior.



**Taula 19.** Gràfics de la relació flux-angle de posició en funció del corrent que adopta segons les versions segona (esquerra) i tercera (dreta) del Model 1.

I també s'observa clarament com l'àrea de treball que ve definida pel comportament del corrent entre les posicions alineada i no alineada és major en la tercera variant que en la segona variant del Model 1.



**Taula 20. Gràfics de la relació flux-corrent de posició en funció de la posició del rotor segons la segona variant (esquerra) o la tercera variant (dreta) del Model 1.**

Així doncs, es pot concloure que el fet d'augmentar el gruix del motor dona, a partir de l'anàlisi estàtic, bons resultats, i per tant, no és descartable quedar-se amb un model de motor que sigui més gruixut que els 50 mm que normalment limiten el seu gruix.

Com s'ha comentat abans, s'ha descartat fer aquest mateix assaig amb el Model 2, ja que veient els resultats, és fàcilment demostrable que el fet d'ampliar el gruix del motor afecta directament al parell que aquest pot generar. Aquest fet, però, no implica cap modificació en la seva ona de parell ni un augment molt destacat en l'àrea de treball de la gràfica de relació flux-corrent entre la zona alineada i no alineada.

El següent pas serà ja, començar a realitzar els assajos dinàmics amb el model escollit. I veure quin aporta millors resultats i aconsegueix més acuradament les necessitats requerides.

## 6.5. Conclusions dels assajos i les variacions del disseny

Després de realitzar tots aquests assajos amb els diferents models presentats, es volen anotar les diferents conclusions a les que s'ha arribat i que poden ajudar a una millora posterior, si s'escaigués en un futur, del motor dissenyat.

En primer lloc fer notar la diferència entre l'àrea que ocupen les línies de relació flux magnètic i corrent de cada angle de gir del motor entre la posició alineada i la no alineada dels pols d'aquest, que hi ha entre els models 1 i 2 i que demostra que la coenergia és clarament superior en el *Model 1*, cosa que permetrà que sigui capaç de generar un major parell.

En segon lloc, destacar que el nombre d'espores dels bobinats del motor, són un dels majors responsables de la inducció del corrent, i per tant de la generació de força magnetomotriu. Això ha demostrat que en la majoria de casos en que s'ha pogut augmentar el nombre d'espores (perquè l'espai ho ha permès), el resultat del parell que entrega el motor és major.

També ressaltar el fet que al reduir l'amplada dels pols, per encabir-hi més espores, ha comportat un augment de la saturació del corrent, ja que té menys espai per circular, i per tant, s'ha hagut de vigilar de no reduir massa aquests espais o bé s'haurà de limitar el corrent a inserir en l'assaig dinàmic.

Per altre banda el fet de reforçar l'eix del motor tot fent-lo més gruixut ha permès per una banda millorar el pas del corrent, i per l'altre fer que aquest disseny de motor gaudeixi d'una estructura més robusta.

Per últim, s'ha comprovat que a l'augmentar la profunditat del motor, aquest és capaç de generar un parell superior, i per tant, pot ser una bona opció de millora si el motor no aconsegueix donar els resultats esperats.

## 7. Simulació del sistema de regulació i control del convertidor i del motor

En aquest apartat es vol veure quin és el comportament del motor quan està en moviment. Per això és necessari desenvolupar amb una eina informàtica un entorn on el motor pugui desenvolupar la seva tasca, es puguin prendre mesures, i aquest pugui ser controlat de diferents maneres per a que pugui variar els seus paràmetres de funcionament.

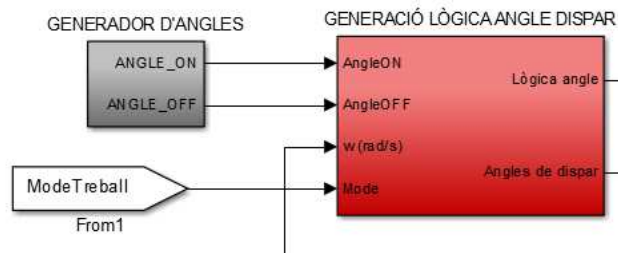
Amb el programa de càlcul *Matlab*, i amb l'entorn *Simulink*, s'ha aconseguit desenvolupar un programa que permet introduir dades per a definir un control concret del motor, definir les seves variables internes, i visualitzar els resultats que s'obtenen de les mesures preses durant l'execució de la simulació.

Aquest programa consta de 3 pantalles principals: en primer lloc la pantalla principal de simulació del sistema, on es poden veure tots els components que integren el conjunt que permet funcionar el motor, és a dir, la generació d'angles de dispar, la regulació de corrent, el control del convertidor, la bateria, el convertidor i el motor; en segon lloc la pantalla de dades del sistema on s'introdueixen totes les variables de funcionament que fan que el motor tingui un comportament o un altre, com per exemple la velocitat de gir, els angles de dispar, el mode de control, el mode de treball (motor o generador), etc.; i per últim la pantalla de visualització de mesures, que permet veure totes les mesures que es prenen al llarg del sistema i que ens aporten informació essencial per a definir les característiques bàsiques del motor dissenyat i les aportacions que aquest pot arribar a fer en quant a eficiència i recuperació d'energia.

A continuació es procedeix a explicar com s'efectua el control del motor per mitjà del convertidor i com s'ha traslladat aquest fet al programa *Simulink* que ens permetrà simular tot aquest procés.

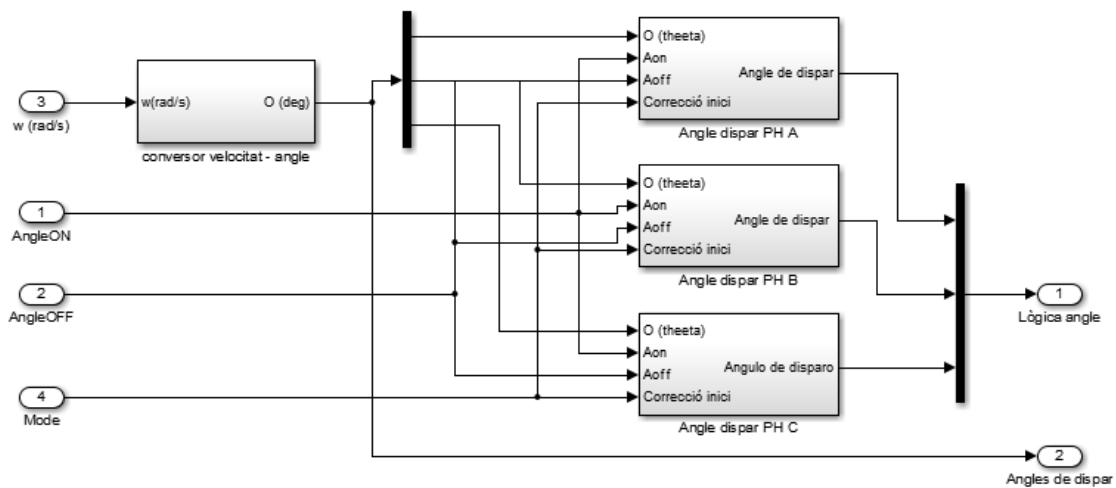
### 7.1. Generació lògica d'angles de dispar

Per al control del convertidor es necessita establir quina és la lògica dels angles de dispar, és a dir, en quin angle de gir del motor s'activa i en quin es desactiva una fase del motor. A partir de les característiques físiques del motor, segons la seva estructura, es definiran l'angle d'ON i d'OFF que més convenients siguin. En aquesta aplicació els angles naturals de commutació són 0 graus per l'angle d'ON i 15 graus per l'angle d'OFF.



Il·lustració 31. Esquema general del bloc de la generació lògica d'angles de dispar

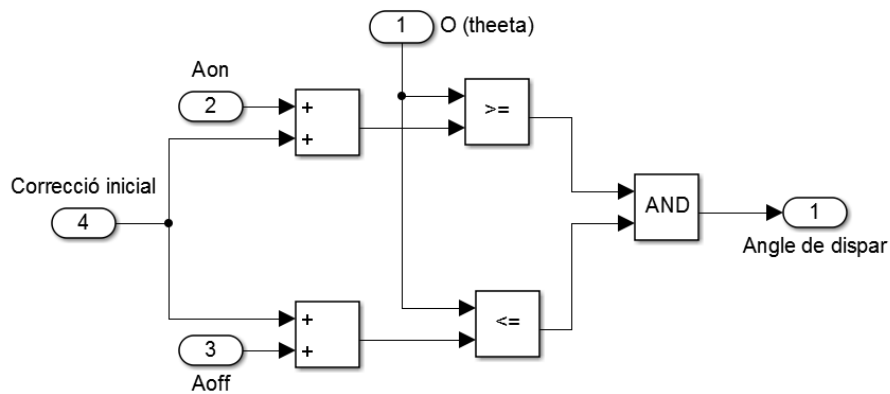
Es pot veure més detalladament en la imatge que les entrades bloc són els angles d'ON i d'OFF, la velocitat angular del motor, en rad/s, i el mode de treball del motor (Motor o Generador).



Il·lustració 32. Bloc de generació d'angles de dispar

Per a funcionar, es realitza l'integral de la velocitat angular en  $^0/s$  i s'obté la posició del motor en cada instant en graus. Així doncs, es compara la posició obtinguda amb els angles d'ON i d'OFF, i si la posició del motor està dins de l'interval de conducció els interruptors es tanquen i condueixen, en canvi, si la posició del motor no està dins l'interval els interruptors s'obren i no permeten el pas de corrent.

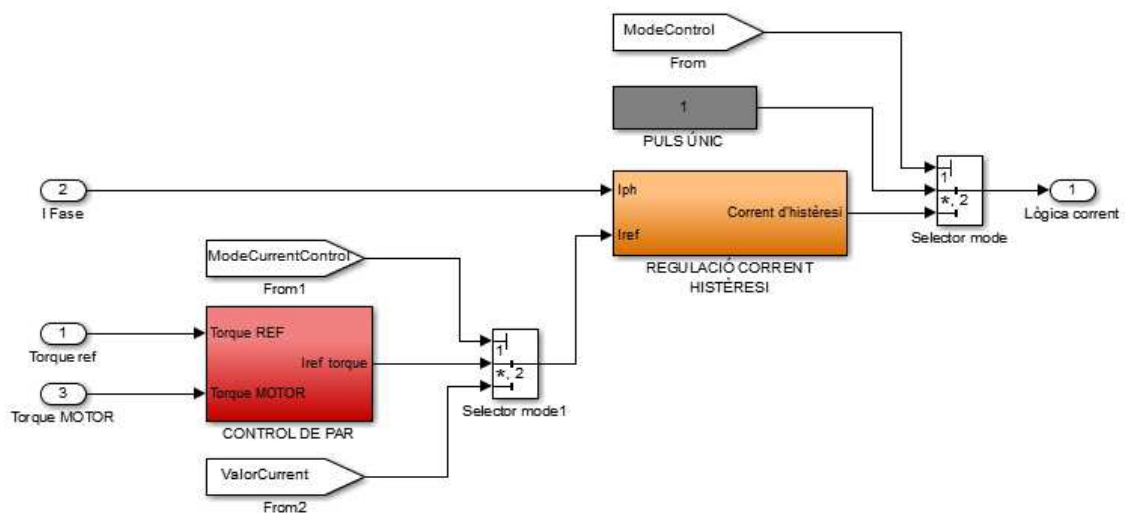
El mode de funcionament aplica una correcció als angles de conducció i els mou en funció de si s'ha de treballar en mode motor o en mode generador. La lògica dels angles de dispar és doncs la següent:



Il·lustració 33. Lògica d'angles de dispar

## 7.2. Control de parell del motor i lògica de corrent

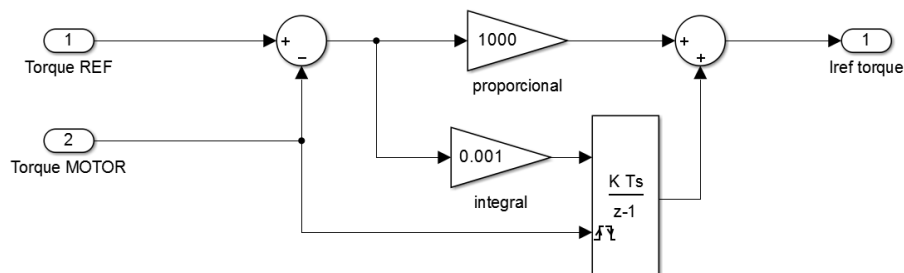
Per a establir certes limitacions pel que fa al comportament del motor, s'utilitzen dues formes de procedir: el control de parell i el control de corrent.



Il·lustració 34. Esquema general del control de parell i regulació d'histèresis

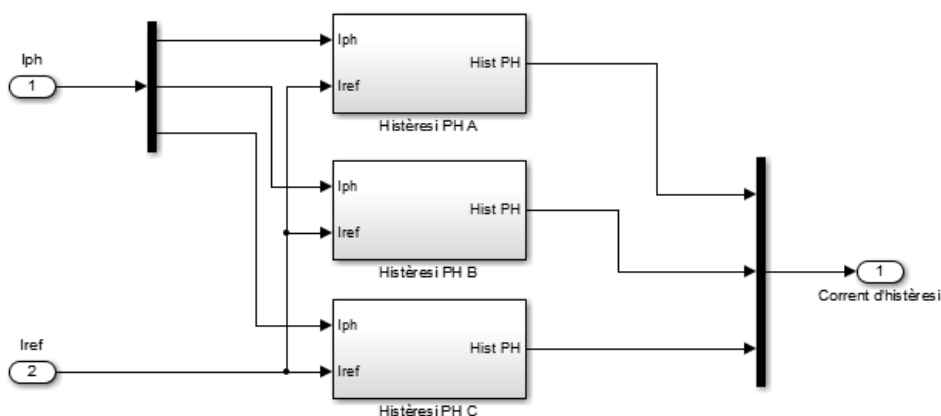
En primer lloc, mitjançant el control de parell s'estableix un parell de referència que es vol que doni el motor, i realitzant un control PI s'obté el corrent de referència per a aquest parell, tal com es veu a continuació:





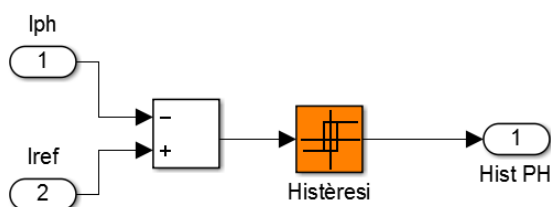
Il·lustració 35. Control de parell realitzat al motor elèctric

Posteriorment aquest corrent es regularà amb un control per histèresi que produirà la lògica del corrent que haurà de seguir el convertidor per a commutar les fases de forma correcta.



Il·lustració 36. Esquema general de la regulació d'histèresi

La regulació per histèresi consisteix en comparar el corrent de cada una de les fases amb el corrent de referència obtingut del control de parell. El valor d'aquest corrent pot variar segons l'amplada de la banda d'histèresi, en el cas que ens ocupa s'ha prefixat per  $\pm 0,5$ .

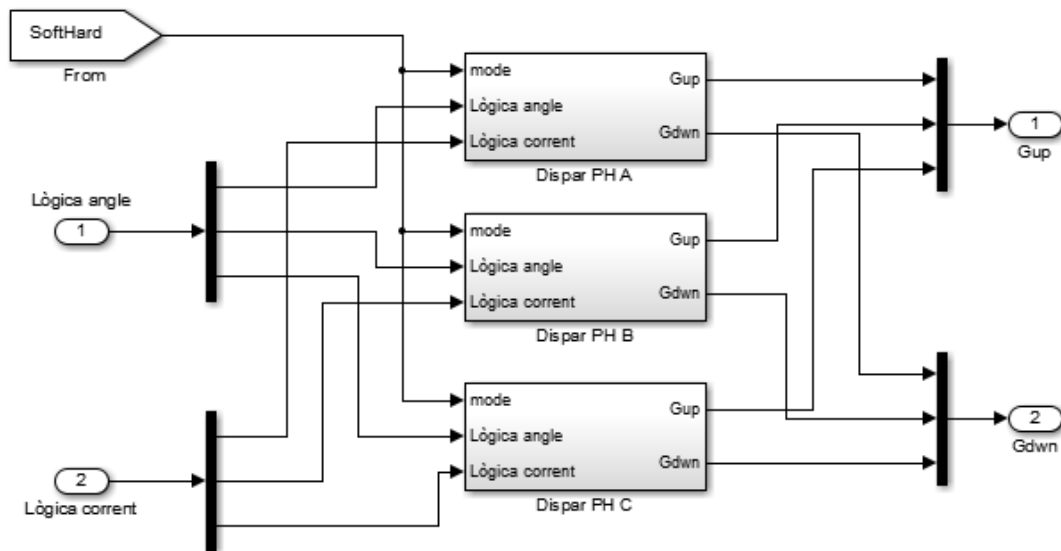


Il·lustració 37. Circuit de regulació per histèresi

Amb tot aquest, procés s'obté la lògica de corrent que s'introdueix al control del convertidor, que és el responsable de la lògica dels disparells dels seus interruptors.

### 7.3. Control lògica dispar dels interruptors del convertidor

El control de lògica de dispar dels interruptors del convertidor té com a missió principal indicar quan s'han de disparar els interruptors de cada fase per tal de que permetin el pas de corrent que alimentarà cada una de les fases del motor de forma independent. En aquest bloc també es determina si el convertidor utilitzarà una tècnica de commutació Soft Chopping o Hard Chopping.



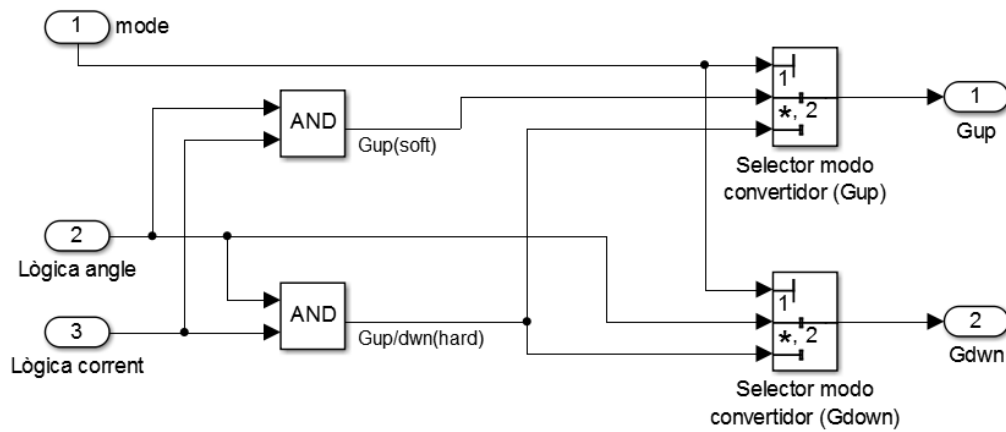
Il·lustració 38. Esquema general del control lògica de dispar dels interruptors del convertidor

S'ha de tenir en compte que la lògica de dispar es divideix en el control de la commutació dels interruptors superiors i els inferiors, i que per a aquest control s'ha de complir la lògica de l'angle de conducció i la lògica de corrent abans descrites.

Les dues tècniques de treballar aquesta commutació són les esmentades anteriorment: el Soft Chopping i el Hard Chopping.

El Soft Chopping és una tècnica que implica que els interruptors superiors han de complir les dues lògiques, la dels angles i la de corrent, i els interruptors inferiors només compleixen la lògica dels angles.

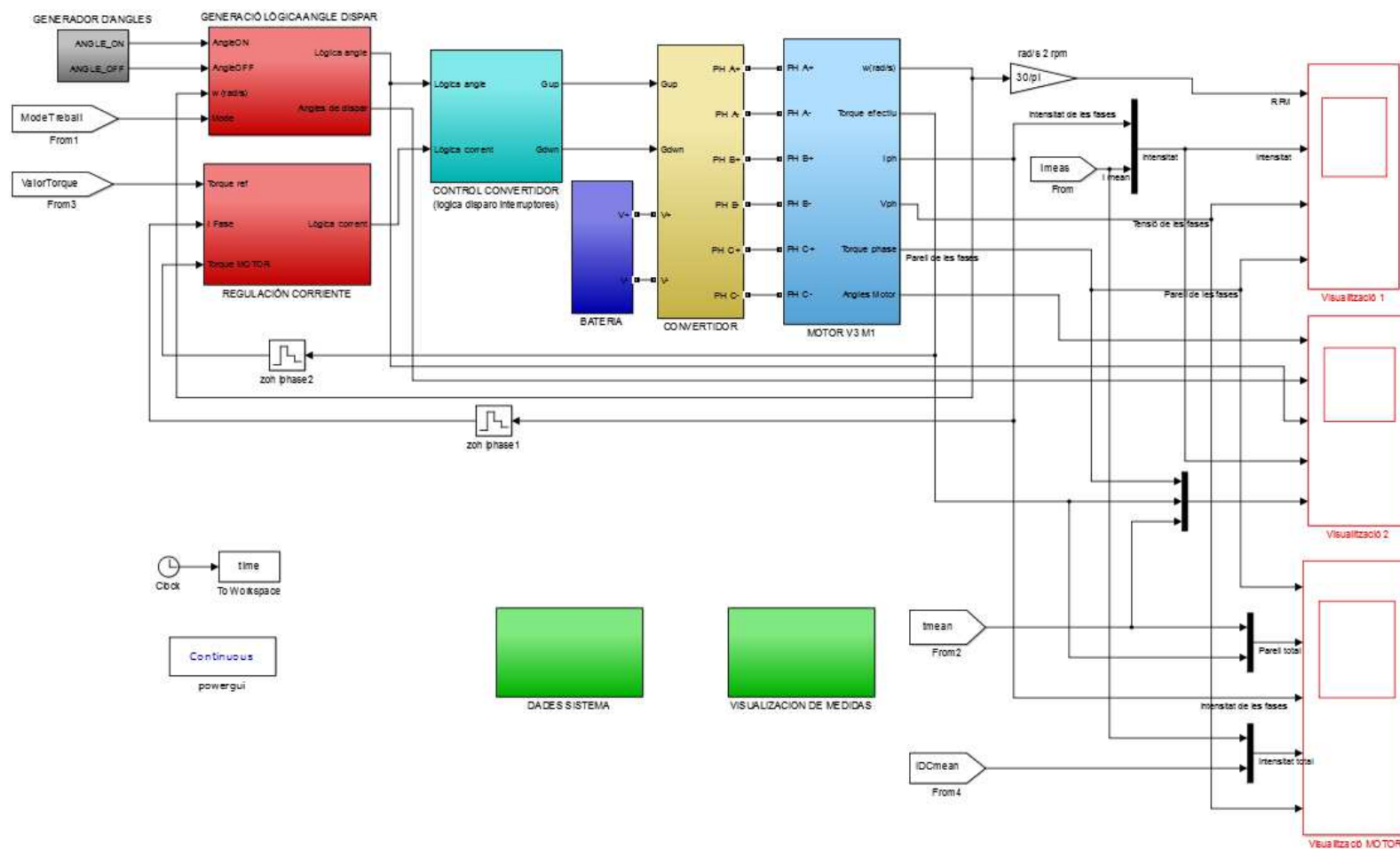
En canvi, en el Hard Chopping tots els interruptors segueixen ambdues lògiques de corrent, per tant funcionen igual els interruptors superiors i inferiors. El circuit que s'ha utilitzat per a realitzar aquesta tasca és la següent:



Il·lustració 39. Circuit lògic de dispar dels interruptors del convertidor

A l'esquema es pot visualitzar a la part superior esquerra mitjançant el camp *mode* que correspon a una entrada del sistema, com s'escollirà la forma de commutar dels interruptors per a veure els diferents resultats que poden generar les dues formes de treballar.

## 7.4. Esquema general del sistema de simulació



Il·lustració 40. Esquema general del sistema de funcionament del motor mitjançant Matlab Simulink.

## 8. Assajos dinàmics de validació:

El sistema de simulació que s'ha descrit i explicat en l'apartat anterior, permet que es puguin realitzar diversos assajos dinàmics per a veure com es comporta el motor que s'ha dissenyat i si aquest compleix amb els objectius establerts.

El que es comprova amb aquests assajos principalment és si el motor funciona correctament com a tal i si la seva corba de parell velocitat és la més indicada o s'ajusta al fi concret del motor. També s'ha volgut comprovar si hi ha molta millora pel que fa al comportament del motor si s'incorpora una petita variació en la seva estructura, fent-lo més gruixut.

Per altre banda, també s'ha volgut veure si l'estructura del motor escollit, permet que aquest treballi com a generador, i si el corrent que pot generar és suficient per a ser retornat a la bateria.

### 8.1. Assaig en mode motor

A continuació es procedeix a fer l'anàlisi dinàmic del motor treballant com a tal. Per a que aquest treballi en mode motor cal que els angles de conducció es disparin en la zona on el parell sigui positiu en la corba de parell obtinguda de l'anàlisi estàtic. Per tal de determinar quin són els angles de dispar més idonis, s'haurà d'obtenir la corba de parell velocitat en diferents angles de dispar. Ja que el motor té una estructura de tres fases i seu *stroke* és de 45°, l'angle de pas és doncs de 15°.

Per mitjà del Software descrit en l'ANNEX B s'obtenen les corbes de parell velocitat. Per fer-ho s'ha de prefixar la tensió del convertidor a 36 V que és la tensió que subministra la bateria al sistema, també cal establir quins són els angles de dispar i la velocitat de gir del motor en revolucions per minut. Una altre indicació és que el sistema de control és a pols únic per a no posar limitacions ni de corrent ni de parell i així s'obtindrà les característiques del motor sense tenir en compte les pèrdues mecàniques ja que no estan considerades en el sistema.

Per tal d'obtenir el millor motor possible per a l'aplicació, i aprofitar al màxim les eines desenvolupades, es vol fer una comparativa entre un tipus de motor concret i aquest mateix model però amb una profunditat (*depth*) superior. Aquest fet permet per veure quin dels dos models dona millors resultats treballant com a motor i fer una comparativa sobre la seva respectiva eficiència.

## 8.2. Estudi de la corba parell velocitat i augment de la profunditat del motor

La corba de parell és un dels trets més característiques dels motors. Serveix per a diferenciar com és el comportament de diferents tipus de motors i analitzar quin pot ser millor en funció del propòsit. En aquesta s'hi veu representada d'evolució del parell que entrega el motor en funció de la seva velocitat de gir.

Un cop escollit quin és el motor amb es vol realitzar els assajos, es valorarà si val la pena ampliar el seu gruix per a obtenir un major parell d'aquest. Per a fer-ho s'haurà d'assajar els dos models de motor que es volen comparar, en les mateixes condicions, i treure conclusions de quin aporta millors resultats i perquè.

L'estudi es farà amb les dues variants de motors derivats del *Model 1*, i això permetrà diferenciar si hi ha millores notables en quant a rendiment i parell entre els dos model que tenen un gruix diferent.

Per a esbrinar quins són els millors angles de dispar del controlador del motor, per a treure'n el màxim profit, s'ha realitzat diversos assajos. S'ha començat a assajar amb la variant 2 del *Model 1*, definida en l'apartat d'anàlisi i millores del motor, que té una profunditat de 50 mm.

Primerament, s'ha escollit una velocitat de treball, dins del rang de velocitats normals de en la que treballarà el motor de la bicicleta, i s'han provat diferents angles de dispar, per veure quins generen millor parell, treballant sempre en mode motor. El control que s'ha simulat en la majoria dels angles és de puls únic, i per tant, no es controla a partir del parell ni del corrent.

La velocitat de gir del motor s'ha mantingut a  $120 \text{ min}^{-1}$ , i s'ha obtingut la següent taula de resultats:

Velocitat = 120 rev/min																
Angles [°]	0 -18	0 -19	0 -20	0 -21	1 - 19	1 - 21	1 - 22	2 -19	2 -20	2 -21	-2 -18	-2 -19	-2 -20	-2 -21	-2 -22	-3 - 19
Parell [Nm]	18,57	19,9	20,04	20,32	16,89	17,68	17,4	13,86	14,76	14,75	23,93	25,47	24,28	24,53	24,25	28,02
Rendiment [%]	63,29	62,19	62,27	60,83	64,65	62,16	59,85	66,94	64,68	64,04	58,22	57,36	58,94	57,65	56,14	55,03

Taula 21. Relació entre angles de dispar, parell i rendiment per a una velocitat del motor de  $120 \text{ min}^{-1}$ .

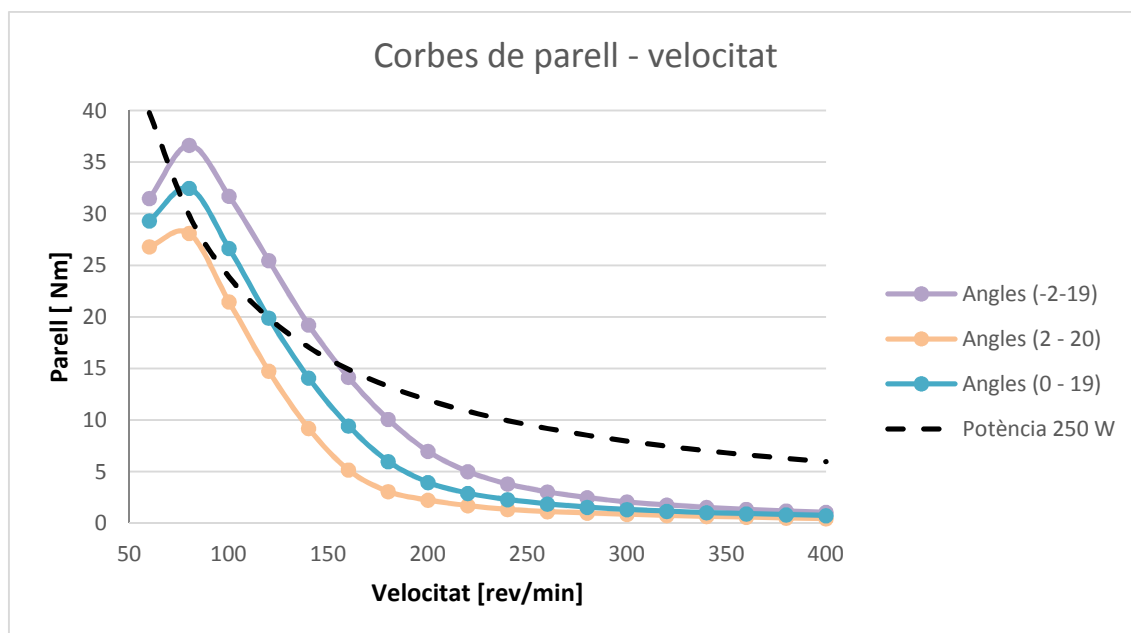
Al realitzar aquests assajos s'ha pogut comprovar que a partir de 21 graus és necessari fer un control per corrent a 16 A si es vol que el motor funcioni correctament. Ja que, de no efectuar-se aquest control en les circumstàncies descrites, es dispara el corrent i la solució no convergeix donant un error al programa de simulació.

Per a complir amb la normativa actual, i amb una velocitat del motor de  $120 \text{ min}^{-1}$ , s'utilitzen els angles de dispar entre 0 i 19 graus ja que aquests donen un parell idèntic del que donaria un motor de 250 w girant a  $120 \text{ min}^{-1}$ .

Per altre banda si es vol aprofitar al màxim la corba de parell en velocitats més elevades s'haurà d'optar per uns angles de dispar entre -2 i 19 graus. Això si, vigilant de no sobrepassar la potència màxima permesa de 250 w mitjançant un control de corrent a les velocitats de gir més baixes.

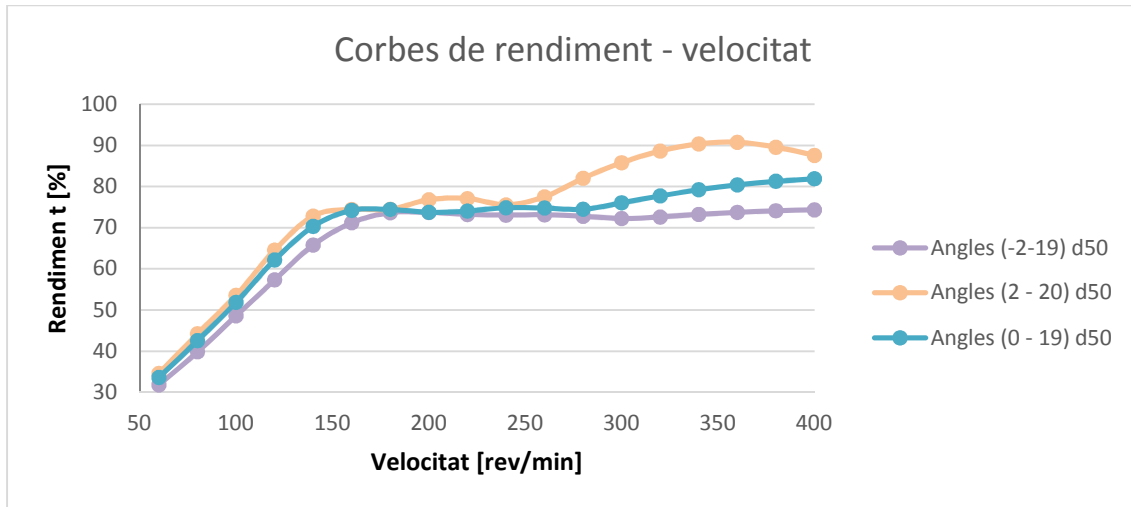
El punt de màxima eficiència, és a dir, aquell que dona un rendiment més òptim i una ona de corrent el més quadrada possible es dona entre els angles de dispar 2 i 19 graus, per a aquesta velocitat, tal i com es veu a la taula.

A la gràfica que es mostra a continuació es veuen representats en un rang de velocitats entre  $60 \text{ min}^{-1}$  i  $400 \text{ min}^{-1}$  els angles de dispar abans esmentats: entre 2 i 20 graus per a una corba que queda just per sota del parell màxim permès per normativa, entre -2 i 19 graus per a una corba amb el màxim parell possible però amb rendiments menors, i per tant menys eficient, i entre 0 i 19 graus per a una corba intermèdia entre les dues anteriors, que supera en alguns rangs de velocitat els 250 w de potència, però que no és tant ineficient com la que produeix més parell.



Gràfica 21. Corbes de parell – velocitat per a diferents angles de dispar en un rang de velocitats de 60 a  $400 \text{ min}^{-1}$  pel motor de gruix 50 mm.

Aquest fet es pot veure també a la gràfica de rendiment del motor obtinguda del mateix assaig:

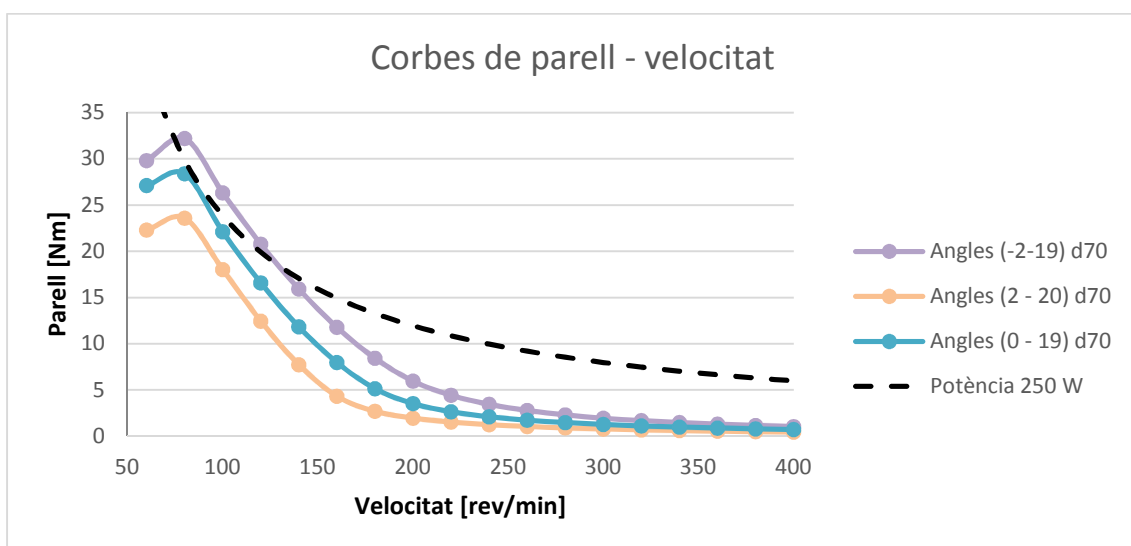


Gràfica 22. Corbes de rendiment per als diferents angles de dispar en un rang de velocitats de 60 a 400  $\text{min}^{-1}$  pel motor de gruix 50 mm.

On es pot veure que els angles de dispar més eficients són 2 i 20 graus, i els més ineficients els que veiem que produïen més parell, 0 i 19 graus.

Per tal de veure si el funcionament del mateix disseny de motor, amb un gruix de 20 mm superior, dona uns resultats més òptims, es realitza el mateix assaig, mantenint els angles de dispar i les velocitats, per a aquest nou motor.

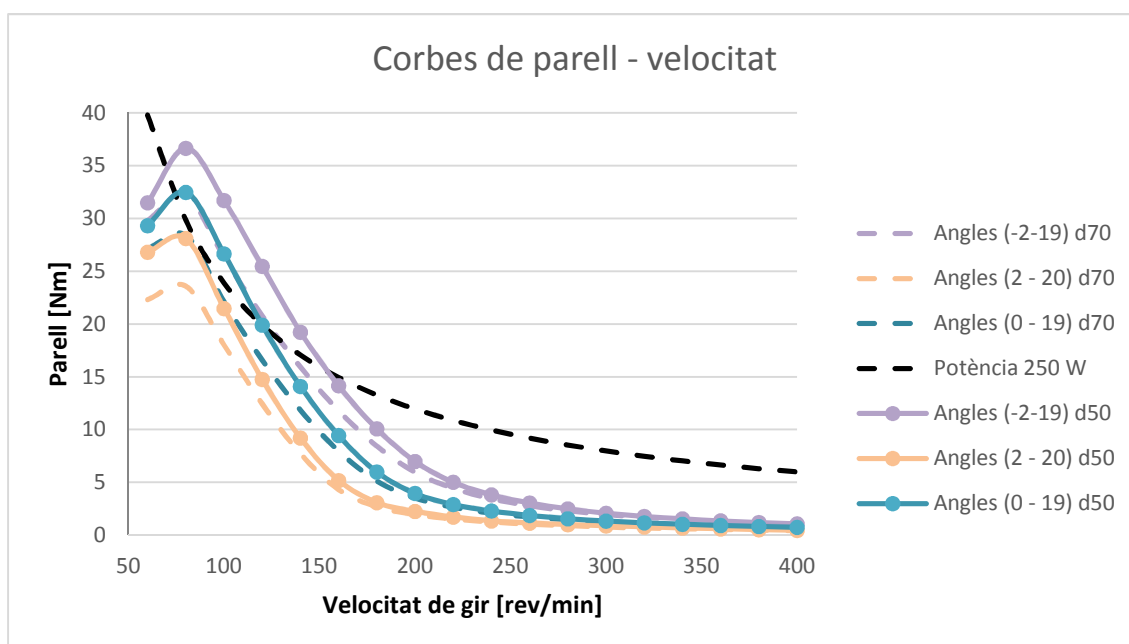
Els resultats que s'han obtingut, en forma de gràfic, són els següents:





Gràfica 23. Corbes de parell – velocitat per a diferents angles de dispar en un rang de velocitats de 60 a 400  $\text{min}^{-1}$  pel motor de gruix 70 mm.

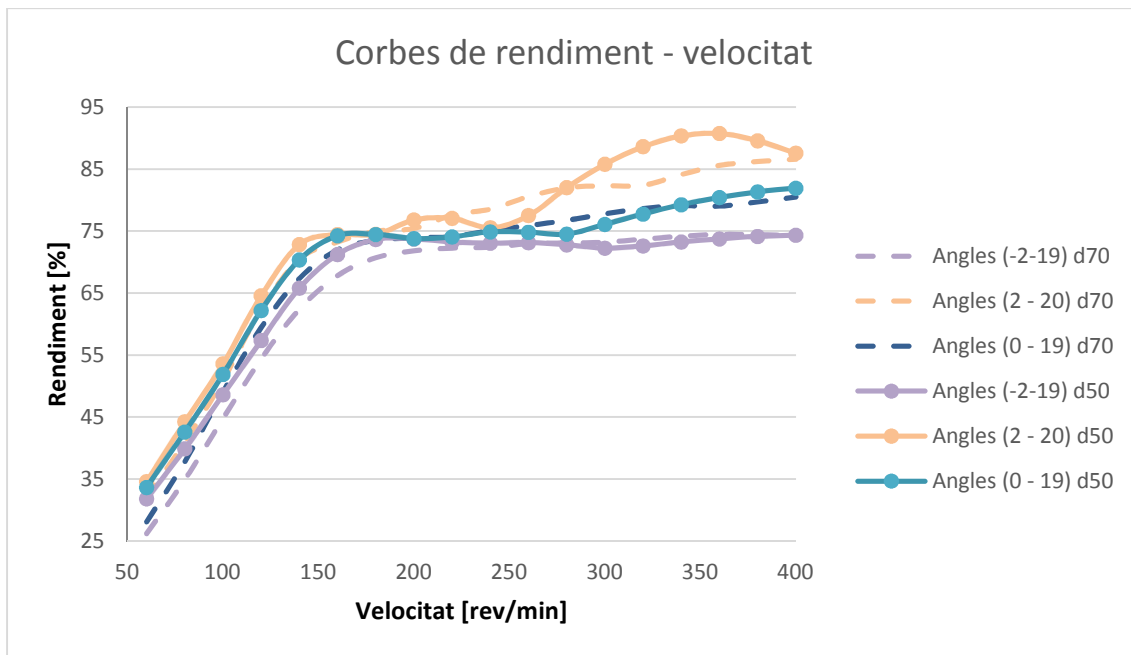
Al superposar totes dues gràfiques s'obté:



Gràfica 24. Corbes parell - velocitat de les dues possibles amplades del motor (depth 50 mm i depth 70 mm) en els diferents angles de dispar analitzats.

Es pot observar doncs, com hi ha una diferència de parell entre el mateix disseny de motor amb dues profunditats diferents. Per una banda es veu de forma clara que el motor amb una profunditat (*depth*) major, no és capaç de generar un major parell utilitzant els mateixos angles de dispar. I per l'altre s'observa com a mesura que el motor augmenta la seva velocitat de gir la diferència de parell que generen tots dos models es redueix de forma progressiva fins a fer-se pràcticament idèntic.

Al fer aquest mateix assaig tenint en compte els rendiments que tenen aquests dos prototips de motor, s'obtenen les següents gràfiques:



Gràfica 25. Corbes rendiment de les dues possibles amplades del motor (depth 50 mm i depth 70 mm) en els diferents angles de dispar analitzats.

Al gràfic es pot veure com el fet de reduir la profunditat del motor (depth) no fa que aquest sigui més eficient, sinó tot el contrari. Per tant, aquesta modificació no comporta millores en quant a eficiència.

Per concloure aquest estudi comentar que, per una banda, a partir dels assajos realitzats es pot afirmar que el motor que s'ha obtingut a partir de les modificacions de dissenys i les seves evolucions dona bons resultats treballant com a motor. Per altre banda, si es vol fer-lo treballar de forma correcta, òptima i d'acord amb la normativa, una bona manera és variar els angles de dispar de manera que s'obtingui el major parell en tot moment, però no es sobrepassi mai els 250 w que marca la normativa de les 'epac'.

Així doncs, en baixes velocitats els angles de dispar idonis per a aquest motor, de profunditat 50 mm, són 2 i 20 graus i amb un control de corrent a 25 A. Tot seguit, es poden mantenir aquests angles de dispar mitjançant un control de parell que limiti la potència a 250 w. A velocitats més elevades, a partir de  $120 \text{ min}^{-1}$  es poden variar els angles de dispar per els de 0 i 19 graus i obtenir així el màxim de parell possible i permès a aquesta velocitat. A l'arribar a les  $160 \text{ min}^{-1}$  es pot passar als angles de dispar -2 i 19 que són els que provoquen una major entrega de parell per part del motor. Aquesta manera de fer el control és la més idònia si el que es vol és un parell que s'assimili al màxim a la corba de parell d'un motor de 250 w girant a les velocitats indicades. Per contra, aquestes indicacions fan que el motor dissenyat no sigui el

més eficient possible, ja que el seu rendiment empitjora a mesura que s'efectuen aquests canvis en els angles de dispar.

Si el que es vol és prioritzar l'eficiència, s'haurà d'agafar els angles de dispar que s'adeqüin més a aquesta necessitat, és a dir, entre 2 i 20 graus. A més, aquests angles tenen l'avantatge que donen lloc a una corba de parell que mai sobrepassarà la corba límit dels 250 w i no requeriran de control de parell per a limitar-lo.

Per altra banda, amb aquest estudi s'ha demostrat que el fet d'engrandir l'amplada del motor, no aporta avantatges notables en quant a la generació de parell d'aquest, sinó tot el contrari, ja que a l'augmentar la profunditat ha provocat una reducció notable en el parell, sobretot en baixes velocitats de gir, que és quan més se'n necessita.

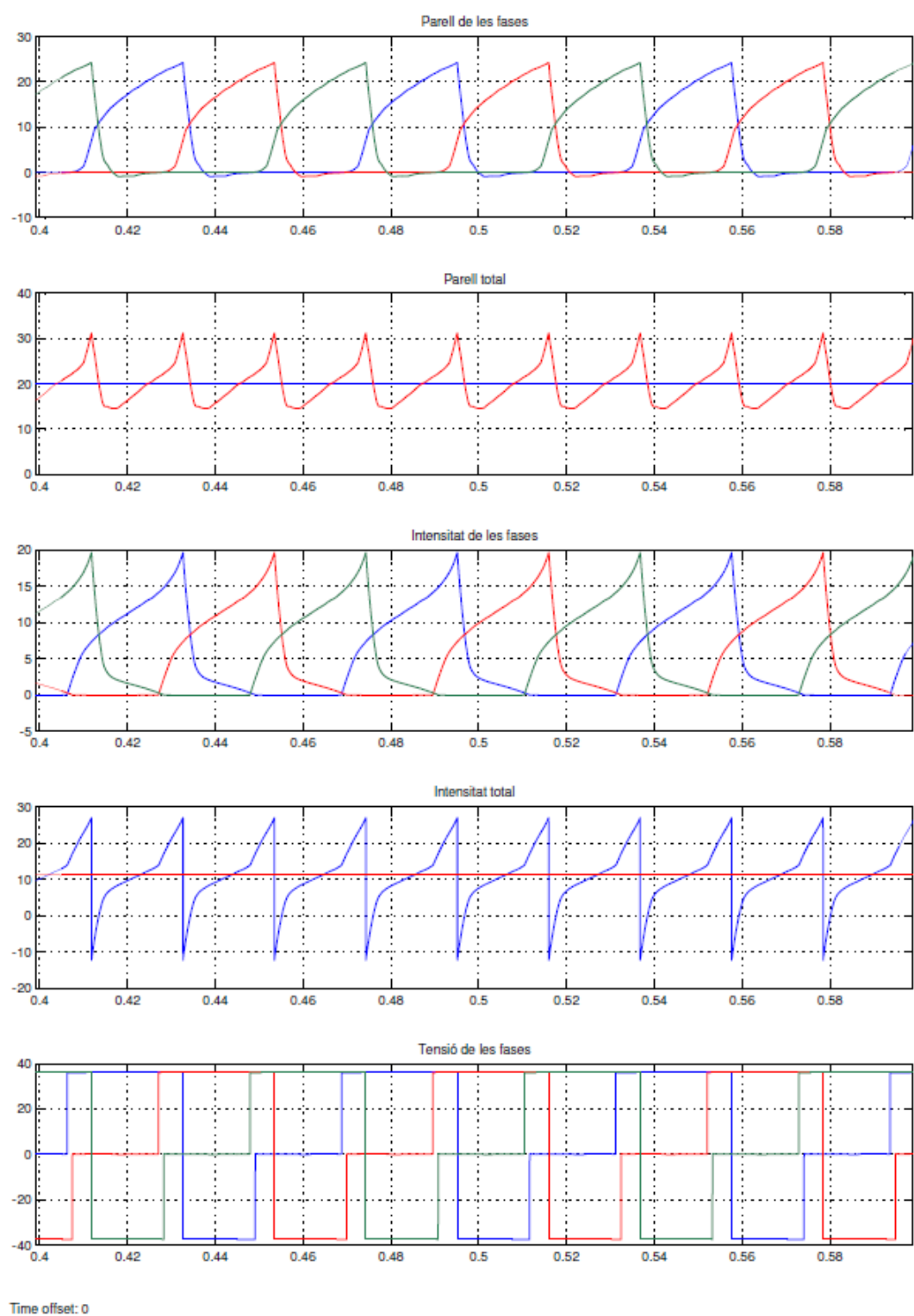
També cal destacar que la modificació en qüestió no provoca una millora d'eficiència. Per tant, no compensa l'increment de costos pel que fa a materials, ni l'augment de pes que comporta aquesta millora.

### 8.3. Formes d'ona del motor

Per tal de veure com es comporta el motor en si durant el seu funcionament, es fa un cop d'ull en com són les seves formes d'ona. Es treballa amb el model que té una profunditat de 50 mm ja que ha donat bons resultats fins ara i es vol que serveixi com a base pels estudis que es realitzen.

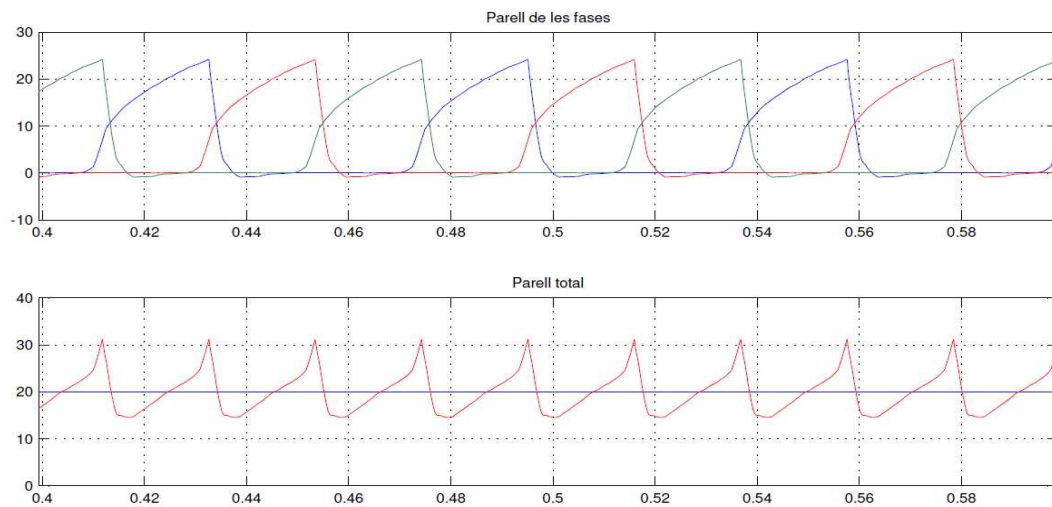
Per començar, cal establir una velocitat de treball concreta de  $120 \text{ min}^{-1}$ , i uns angles de dispar òptims en quant a parell i rendiment: 0 i 19 graus. El mode de control dels interruptors en el qual es treballa és de pols únic.

A continuació, es pot veure com varien les formes d'ona del convertidor i el controlador del motor:



Il·lustració 41. Resultats de l'anàlisi dinàmic funcionant com a motor

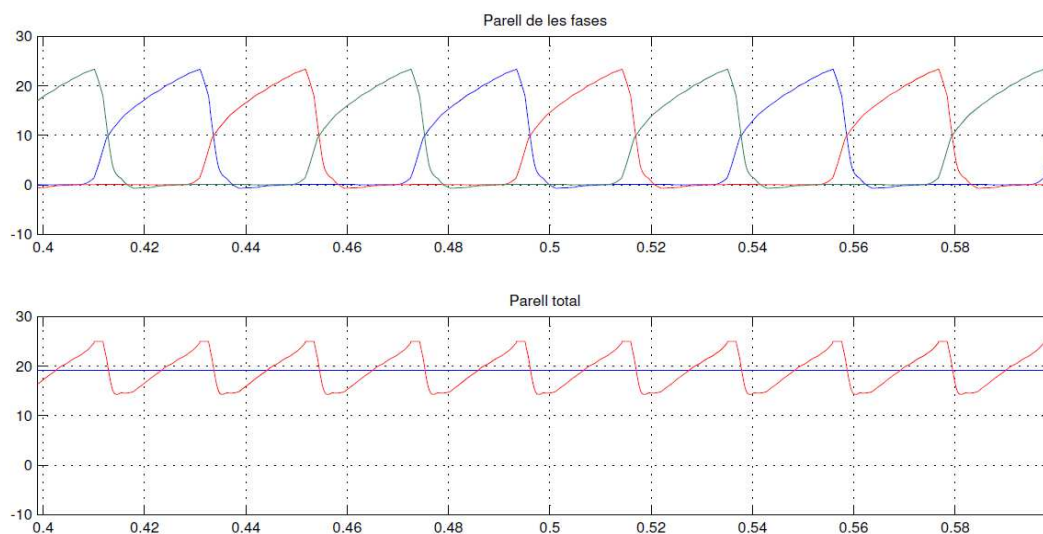
Pel que fa al parell podem veure com actua a mesura que s'activa cada fase, quin és el parell total i quin és el parell mig que entrega el motor.



**Il·lustració 42. Detall de la il·lustració 50 del parell de les fases, el parell total i el parell mig que proporciona el motor**

Es pot veure al gràfic com el parell total que entrega el motor no és estable ja que el seu rang de treball oscil·la entre els 15 i els 31 Nm. Això fa que el parell mig sigui aproximadament d'uns 20 Nm.

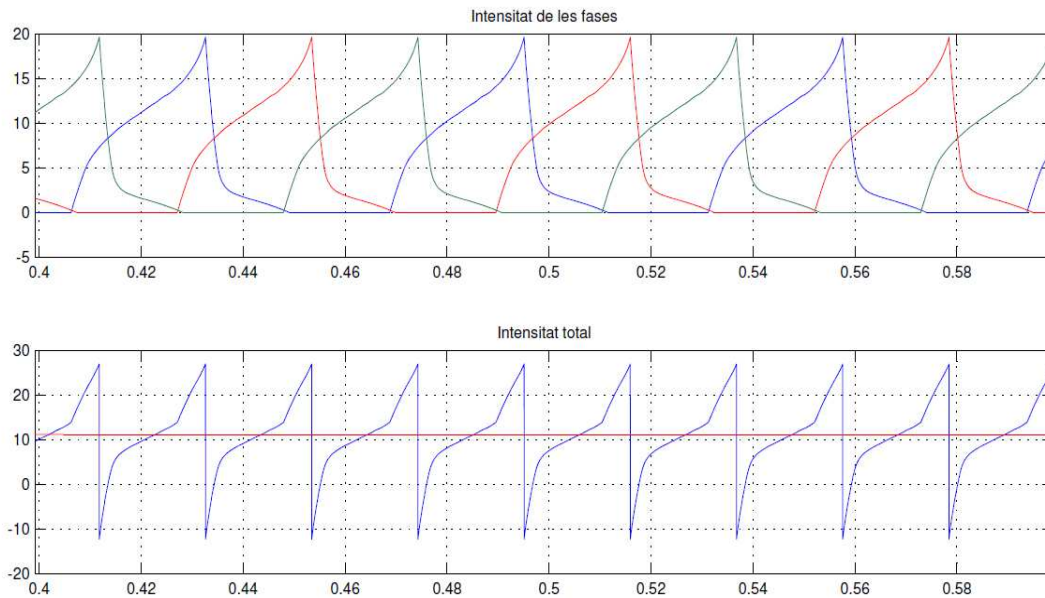
Si es vol que aquest parell sigui més estable es pot fer un control que enlloc de puls únic sigui un control de parell de 25 Nm. Els resultats que s'obtenen al realitzar-se aquesta modificació en el control són els següents:



**Il·lustració 43. Detall del parell de les fases, el parell total i el parell mig que proporciona el motor girant a  $120 \text{ min}^{-1}$  amb un control de parell de 25 Nm.**

S'observa doncs, com amb el control de parell s'aconsegueix que el rang del parell total que entrega el motor girant a  $120 \text{ min}^{-1}$  sigui menor (de 15 a 26 Nm) i per tant, més estable. Això sí, el parell mig baixa de 19,88 a 19,15 Nm quan s'aplica aquest control de parell.

Per altre banda el comportament del corrent del motor és el següent:



**Il·lustració 44. Detall del corrent de les fases, el corrent total i el corrent mig que proporciona el motor girant a  $120 \text{ min}^{-1}$  amb un control de parell de 25 Nm.**

Es pot veure al gràfic la forma d'ona del consum de corrent de les diferents fases del motor. També com una petita part d'aquest corrent és retornat per mitjà del bus de continua al la bateria a través del convertidor (valors negatius de corrent).

El valor mig del corrent consumit pel motor funcionant a la velocitat descrita i amb els angles de dispar indicats és doncs de 10,57 A amb el control de parell a 25 Nm. Si hagués utilitzat un control de puls únic el seu consum de corrent mig hagués sigut d'11,13 A.

#### 8.4. Motor en mode generador

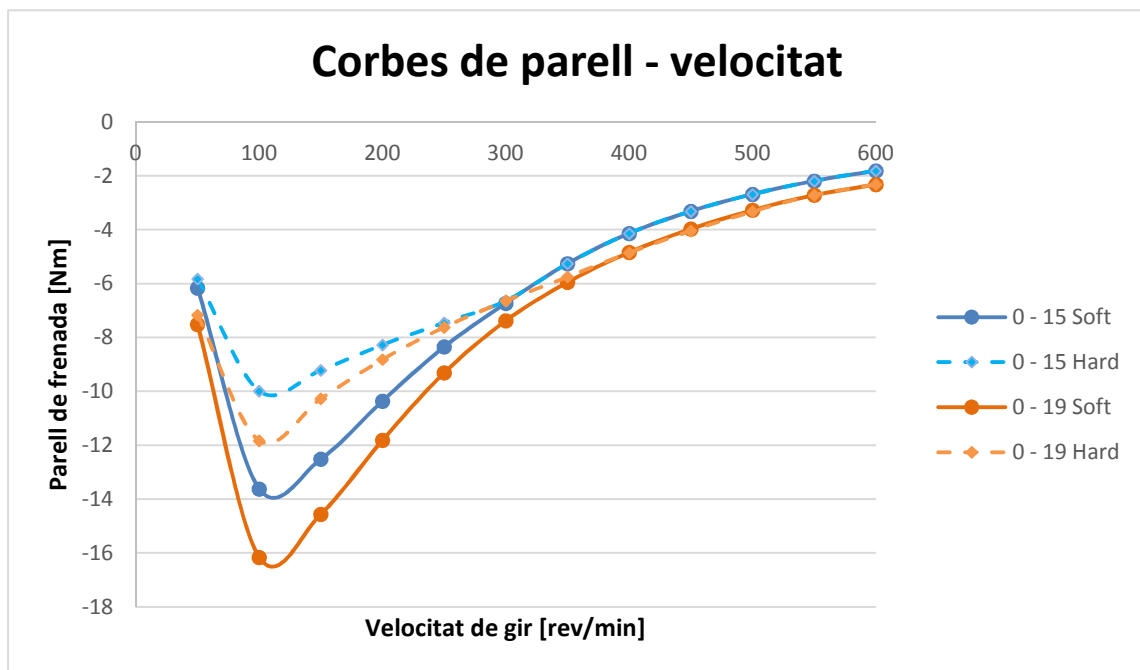
Tot seguit s'efectua l'anàlisi dinàmic del motor treballant en mode generador. A diferència del mode motor, a l'hora de treballar en mode generador els angles de conducció s'han de disparar en la zona de l'ona de parell del motor que s'ha obtingut de l'anàlisi estàtic d'aquest, on el parell és negatiu.

Així doncs, s'ha d'obtenir les corbes de parell en funció de la velocitat del motor i amb diferents angles de dispar que permetran veure la capacitat de frenada del motor, i a quins angles és més efectiva. Per altre banda es mostrarà també les corbes d'intensitat de retorn de corrent a la bateria també en funció de la velocitat del motor, i per als mateixos angles de dispar que les corbes anteriors.

Per a poder veure fins a quin punt es poden millorar els resultats obtinguts de cada assaig, s'ha optat per un control de corrent mitjançant histèresi. Això permetrà veure quina diferència hi ha quan s'actua mitjançant una estratègia de commutació Softchopping i una Hardchopping, i quina aporta millors resultats.

#### 8.4.1. Corbes de parell velocitat en mode generador

S'ha fet l'assaig en mode generador per als angles de dispar següents: entre 0 i 15 graus i entre 0 i 19 graus, i en un rang de velocitats de 50 a 600  $\text{min}^{-1}$  i amb els modes de commutació Softchopping i Hardchopping. Aquest anàlisi ha permès obtenir els següents resultats:

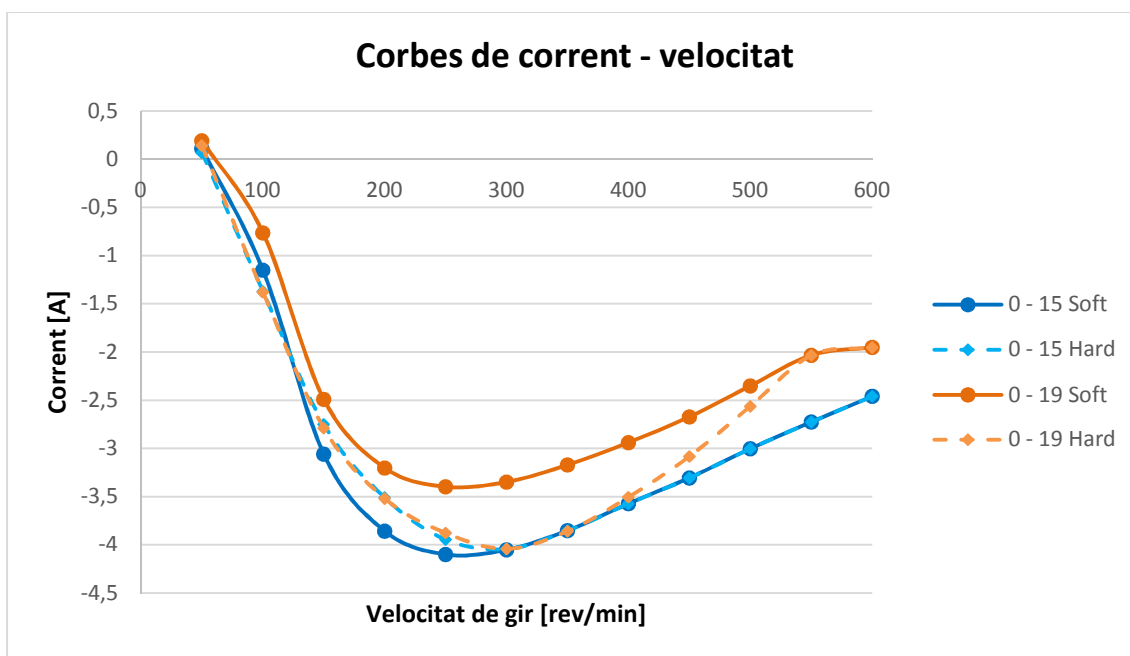


Gràfica 26. Representació del parell en funció de la velocitat del motor

S'observa doncs, com és el comportament del motor tot indicant el seu parell de frenada quan treballa com a generador. Es pot concloure que el major parell de frenada s'obté amb el mode de commutació del motor Softchopping i més concretament amb els angles de dispar 0 i 19 °.

#### 8.4.2. Corbes de corrent velocitat en mode generador

Les corbes obtingudes de l'assaig anterior, per tal de mostrar el retorn de corrent del motor cap a les bateries del sistema, i en funció de la velocitat de gir del motor, són:



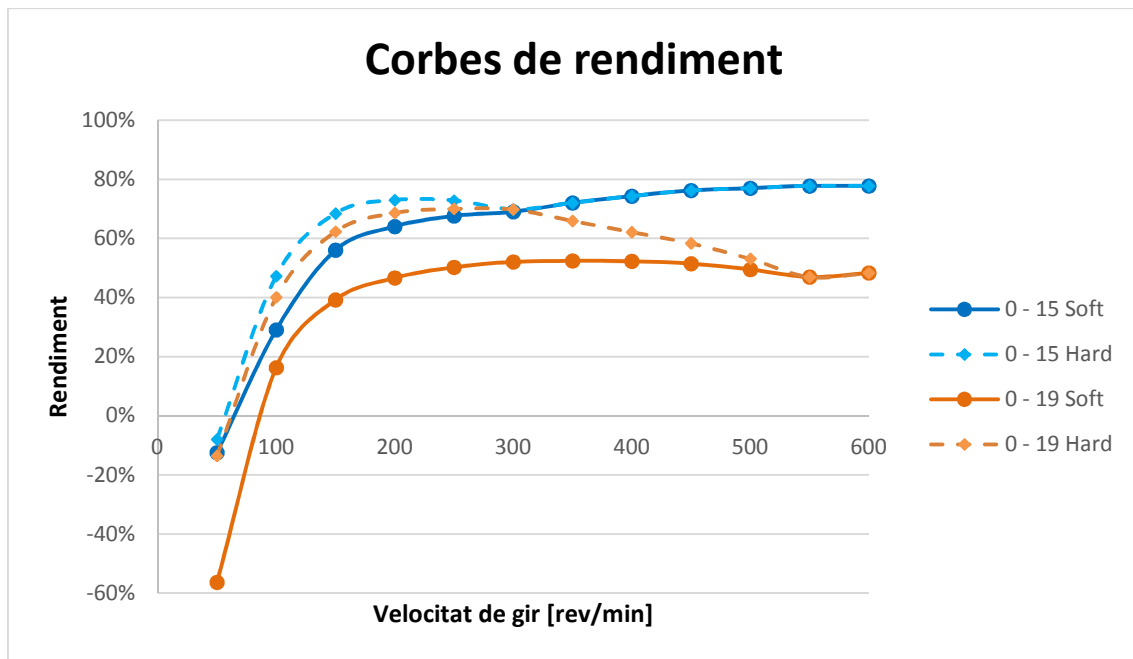
Gràfica 27. Representació del corrent retornat en funció de la velocitat del motor

Es pot veure al gràfic que els angles de dispar de 0 a 15 graus entreguen en un major rang de velocitats un valor de corrent superior que els angles de 0 a 19 graus. I també es veu com es modifica aquest comportament si s'aplica un control de la commutació dels interruptors a mode Softchopping o Hardchopping. En el cas dels angles 0 i 15 graus el mode Softchopping aporta millors resultats pel que fa a l'entrega de corrent. I en el cas dels angles 0 i 19 graus passa tot el contrari.

#### 8.4.3. Corbes de rendiment en mode generador

Per tal de veure l'eficiència del motor dissenyat quan treballa com a generador, es mostren els següents gràfics amb els angles abans esmentats i amb els mateixos modes de commutació dels interruptors.





Gràfica 28. Gràfic del rendiment del motor en funció de la seva velocitat de gir

Es pot observar al gràfic com el sistema de commutació Hardchopping dona millors resultats que el Softchopping pel que fa al rendiment en ambdós casos. També es fa palès com amb els angles de dispar 0-15 graus l'eficiència del motor és major que amb els angles de dispar 0 i 19 graus, i a la seva vegada el resultat millora si els interruptors treballen en mode Hardchopping.

#### 8.4.4. Conclusions de l'assaig

Veient els gràfics que s'han obtingut amb la realització de l'assaig del motor en un rang de velocitats de 50 a 600  $\text{min}^{-1}$ , fent servir diferents tècniques de commutació dels interruptors i amb diferents angles de dispar, es poden extreure les següents conclusions:

En primer lloc, els angles de dispar que ofereixen millors resultats d'eficiència i que a la vegada generen el valor més elevat de corrent de retorn, són els que van de 0 a 15 graus.

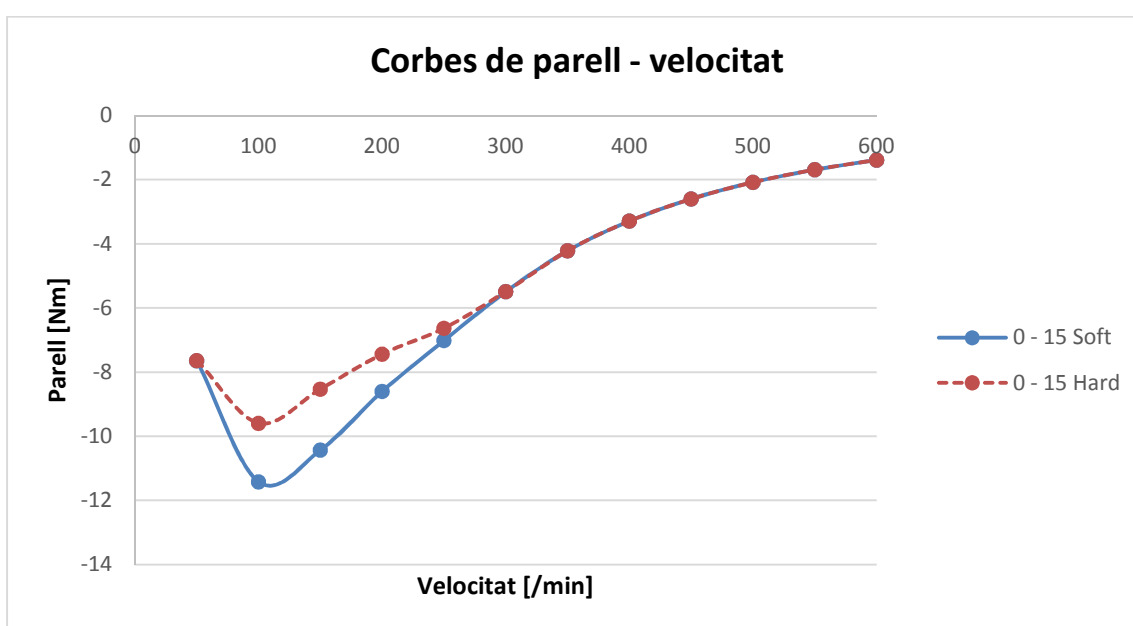
Per altre banda, si es vol aconseguir un parell de frenada el més elevat possible amb els angles de dispar esmentats, s'haurà d'optar per una commutació Softchopping dels interruptors.

I per últim, el rang de velocitats ideal per a poder regenerar el màxim d'energia provinent del motor és entre 150 i 500  $\text{min}^{-1}$ , amb un resultat que ronda els 4 A de corrent de retorn quan el motor va a unes velocitats entre 200 i 350  $\text{min}^{-1}$ .

#### 8.4.5. Augment de la profunditat del generador

Per mirar de veure si es poden arribar a uns majors nivells d'aprofitament del motor treballant com a generador, s'ha volgut assajar el mateix model però amb un gruix més superior. Com en el cas del funcionament en mode motor s'ha fet amb un gruix de 70 mm, és a dir 20 mm superior al model original.

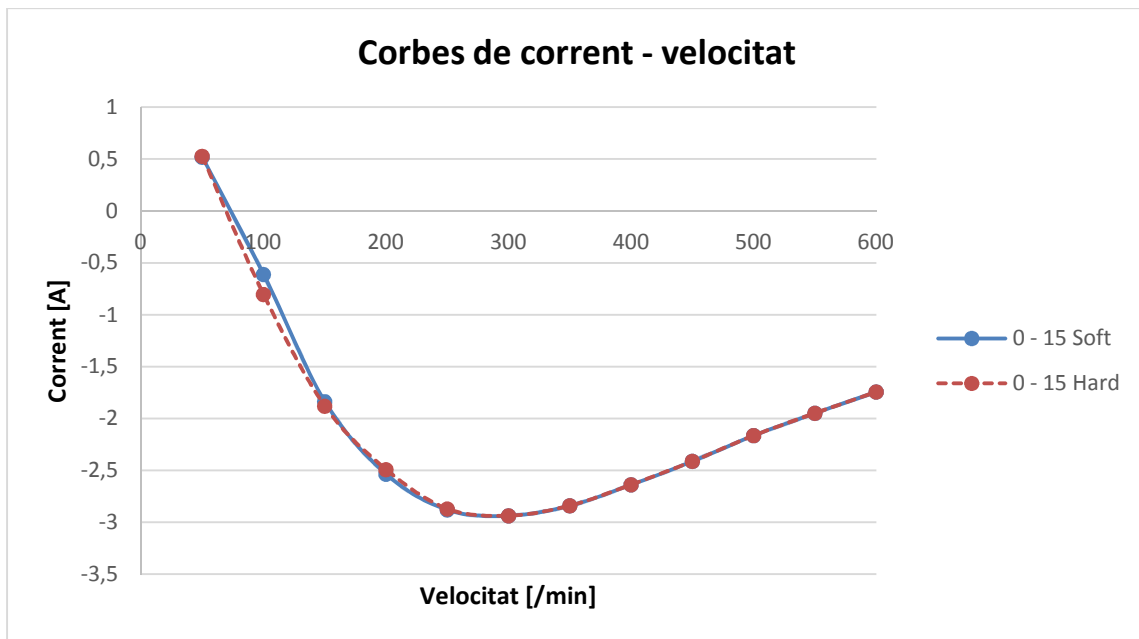
Pel que fa al parell de frenada del motor treballant en mode generador amb uns angles de dispar 0 i 15 graus, mitjançant el control dels interruptors Softchopping i Hardchopping, amb un control de corrent de 10 A i un rang de velocitats de 50 a 600  $\text{min}^{-1}$ , el resultat obtingut és el següent:



Gràfica 29. Representació del parell en funció de la velocitat del motor

Es pot veure com, quan s'utilitza un mode de control dels interruptors de tipus Softchopping, s'aconsegueix un parell de frenada lleugerament major que en el mode Hardchopping, sobretot en baixes velocitats de gir del motor, i que, a mesura que aquesta augmenta, els parells es van igualant fins a ser pràcticament idèntics a partir de les 300  $\text{min}^{-1}$ .

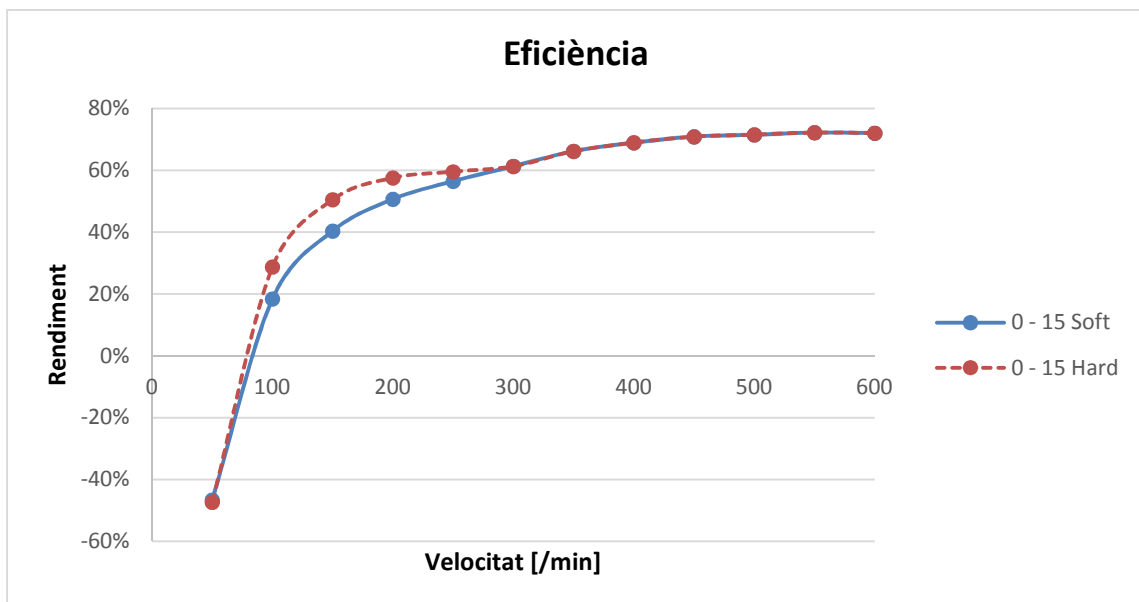
Amb els mateixos paràmetres, el gràfic de retorn de corrent del generador a la bateria en funció de la velocitat és aquest:



Gràfica 30. Representació del corrent retornat en funció de la velocitat del motor

On es pot veure que la variació entre els dos tipus de control dels interruptors és mínim, i que el retorn de corrent màxim es produeix entre el rang de velocitats que va de les  $200 \text{ min}^{-1}$  fins les  $450 \text{ min}^{-1}$ , on és capaç de generar entre 2,5 i 3 A de corrent.

Pel que fa a l'eficiència:

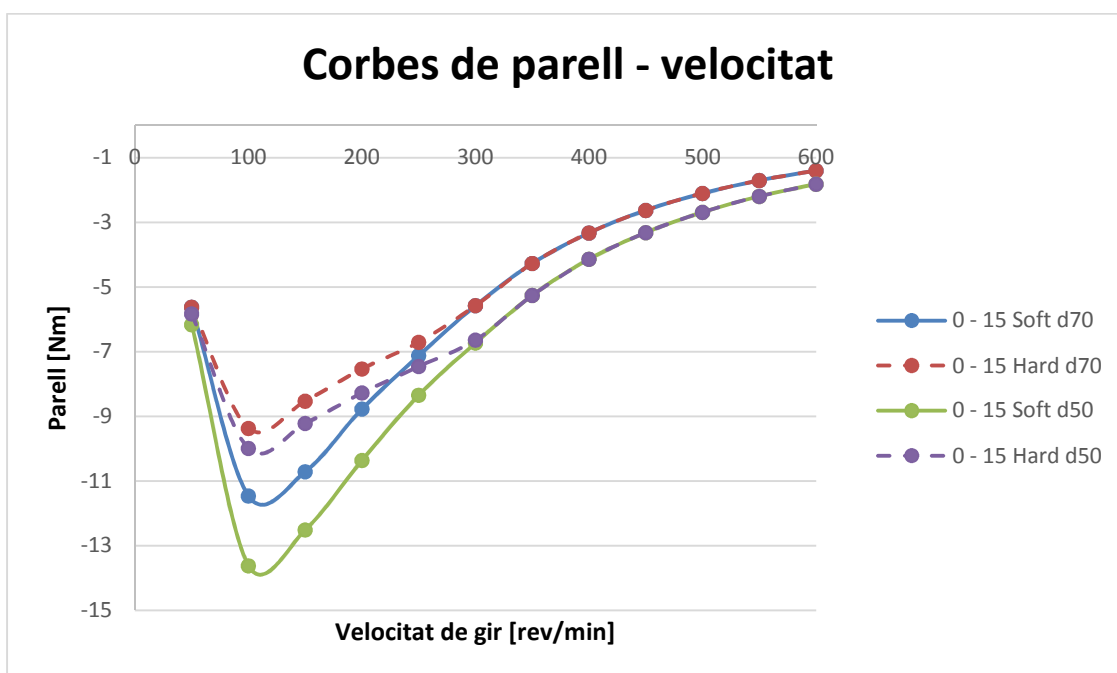


Gràfica 31. Gràfic del rendiment del motor en funció de la seva velocitat de gir

Es pot veure doncs, com el control dels interruptors via Hardchopping proporciona un resultat una mica més eficient sobretot en baixes velocitats. També que l'eficiència es manté força estable en un rang alt de velocitats, entre 350 i 400  $\text{min}^{-1}$  fregant valors del 70%.

Per a poder contrastar millor aquests resultats, s'han comparat els millors resultats obtinguts amb el disseny inicial del motor, i els que s'acaben d'obtenir amb aquesta diferència pel que fa al disseny del motor. Òbviament, s'han mantingut els angles de dispar, el mode de control dels interruptors i el rang de velocitats per a fer una comparativa idònia.

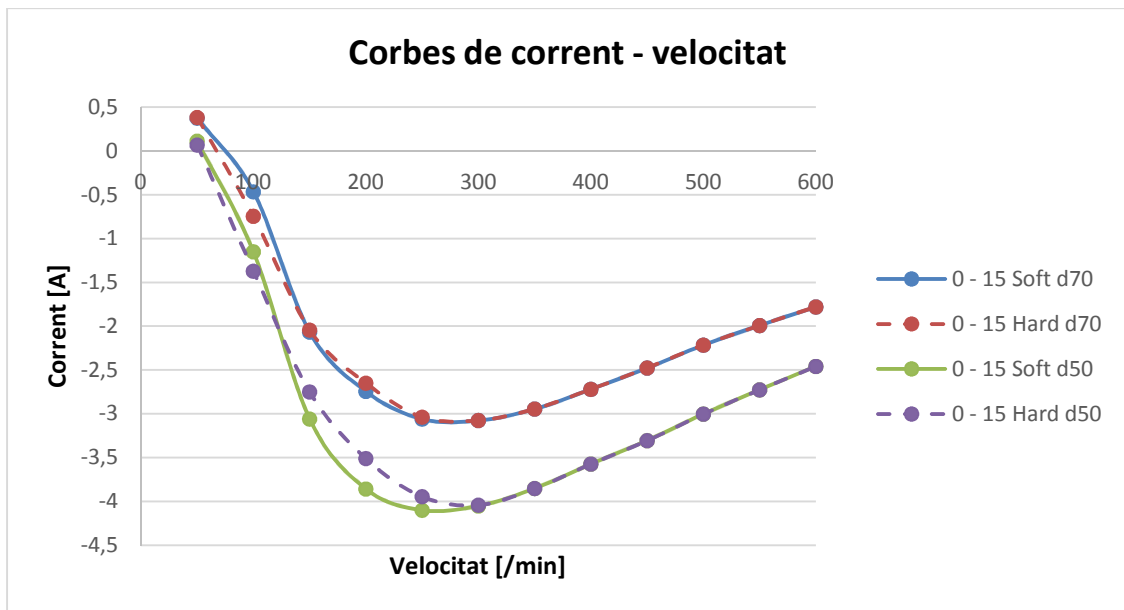
La comparativa de les corbes de parell velocitat és la que es mostra a continuació:



Gràfica 32. Representació del parell en funció de la velocitat del motor

Al gràfic es veu com el motor, funcionant com a generador, amb una profunditat de 50 mm proporciona un parell de frenada superior a la que proporciona el mateix motor amb una profunditat de 70 mm. On s'accentua més aquesta diferència de parell és a la velocitat de gir del motor, que treballa en mode generador, entre les 100 i les 200  $\text{min}^{-1}$  i en mode Hardchopping.

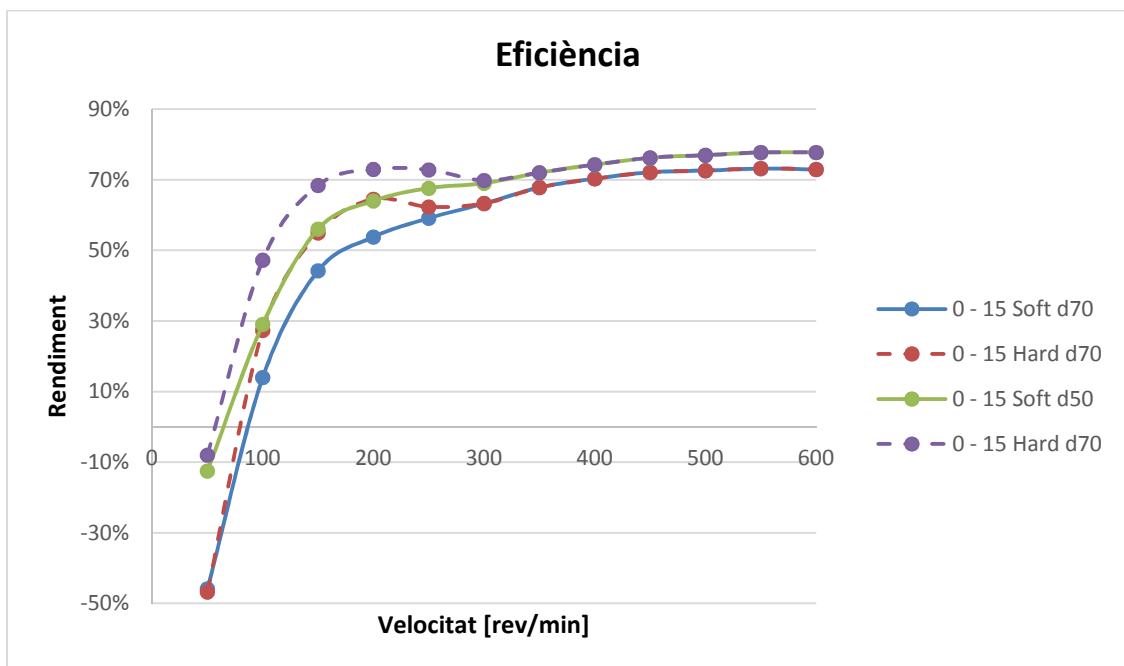
Pel que fa a la generació de corrent per part del motor, podem veure al gràfic la comparativa entre aquests dos models:



Gràfica 33. Representació del corrent retornat en funció de la velocitat del motor

Es veu de forma molt clara al gràfic que el corrent retornat a la bateria serà superior en el cas del motor amb una profunditat de 50 mm. I també que aquesta diferència s'accentua a mesura que s'adopten rangs més grans de velocitat (a partir de les  $150 \text{ min}^{-1}$ ).

I pel que fa la comparació d'eficiència la gràfica és la següent:



Gràfica 34. Gràfic del rendiment del motor en funció de la seva velocitat de gir

Es pot veure com ambdós prototips de motors es comporten de forma força similar però que el motor que té una millor eficiència és el de 50 mm de profunditat. A banda coincideix que el fet de variar la commutació dels interruptors de Softchopping a Hardchopping suposa un augment d'eficiència en el rang de velocitats més baixes (entre 100 i 200  $\text{min}^{-1}$ ).

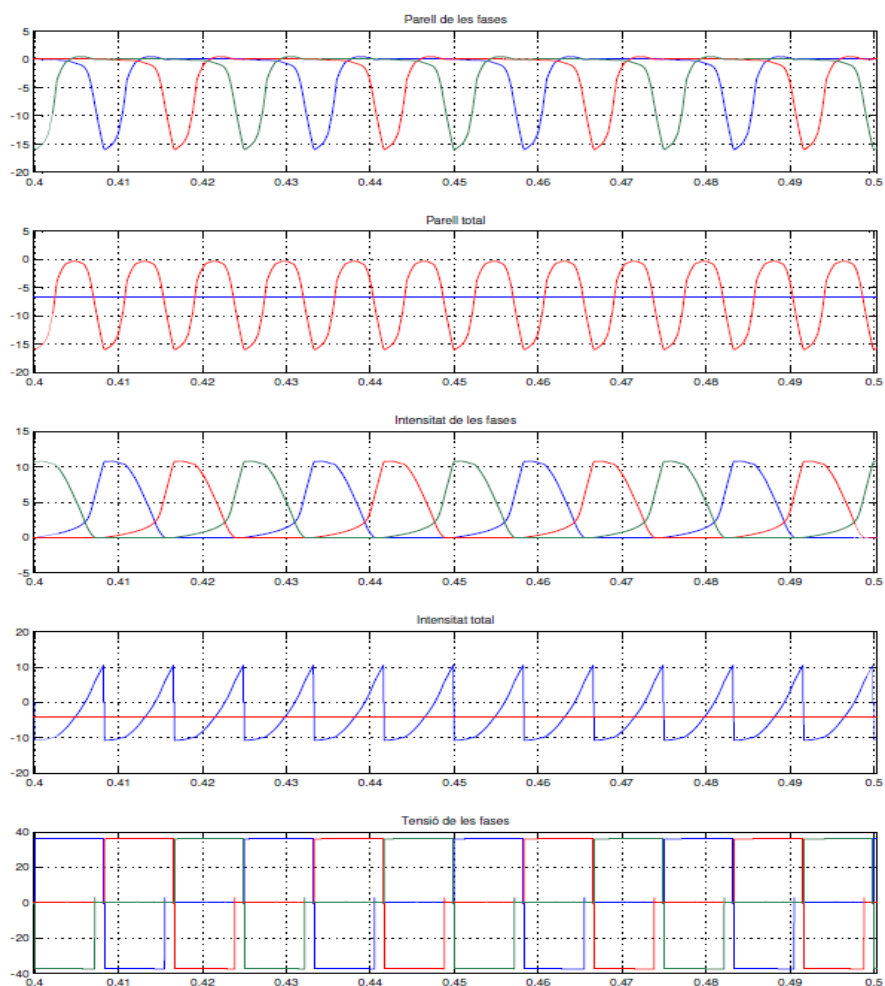
Així doncs, com a conclusions es pot afirmar que, si es vol fer servir el mateix motor però amb una profunditat major per a funcionar com a generador, els resultats no són tan bons com en el motor original. Això és degut a que, com s'ha vist, el seu parell de frenada del motor de 70 mm de profunditat no és tan elevat com el de 50 mm, i per altre banda, no és capaç de retornar tanta corrent com ho fa aquest, tot i tenir valors no gaire distants d'eficiència.

Per tant, el més convenient és que si es vol generar energia i potenciar un estalvi energètic tot aprofitant el corrent que desprèn el motor quan treballa com a generador, el més correcte serà que aquest motor tingui un gruix de 50 mm. A més, per tal de treure'n el màxim profit, el més adequat serà fer-ho treballant en un rang de velocitats d'entre 150 i 500  $\text{min}^{-1}$  i amb els angles de dispar 0 i 15 graus. A partir d'aquí s'haurà de decidir: si es vol prioritzar l'eficiència en front del parell de frenada s'escull un control dels interruptors tipus Hardchopping; si pel contrari es vol prioritzar el parell de frenada, ja que és necessari per algun tipus de circumstància, com ho seria un fort pendent per exemple, s'escull un control de tipus Softchopping.

### 8.5. Formes d'ona del generador

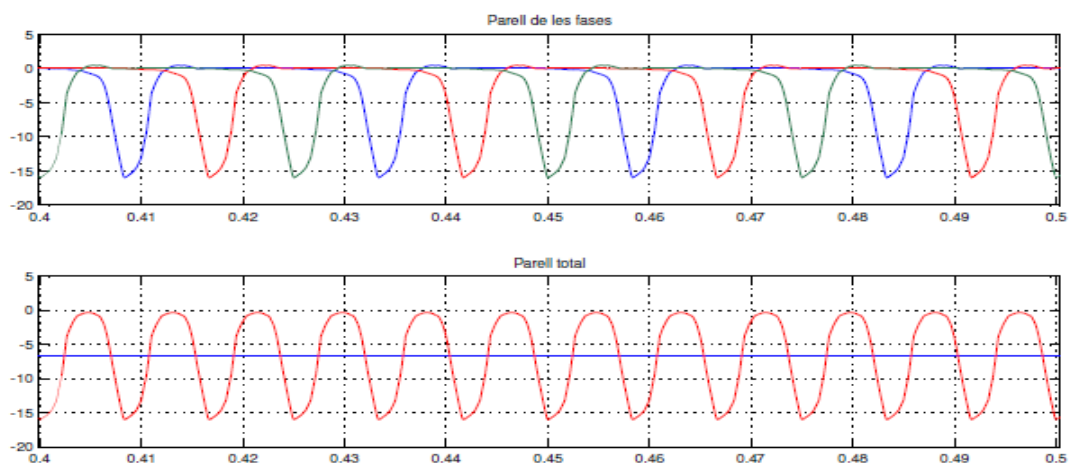
Pel que fa al mode generador, s'ha realitzat l'assaig a una velocitat de 300  $\text{min}^{-1}$ , amb uns angles de dispar de 0 i 15 graus, amb el mode de control de la commutació dels interruptors Softchopping, i amb un control de corrent de 10 A, ja que és el que ens ofereix millors resultats d'eficiència i de retorn de corrent a la bateria.

Les dades que s'han extret sobre el funcionament del motor es presenten en forma de gràfics a continuació:



Il·lustració 45. Resultats de l'anàlisi dinàmic funcionant com a generador

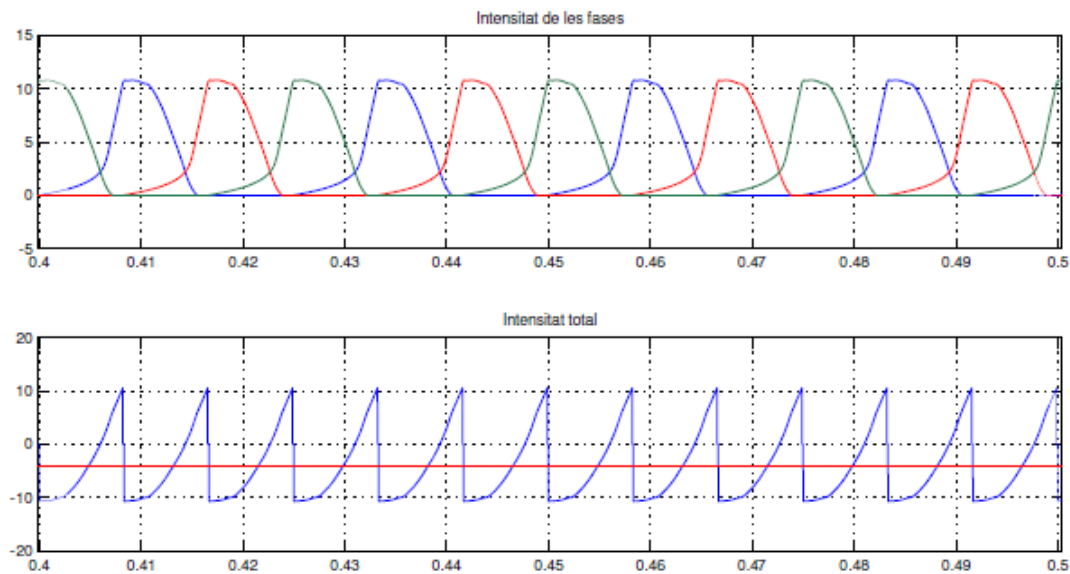
Pel que fa al parell de cada fase, el parell total d'aquestes i el parell mig, es pot veure com aquest dona valors negatius, per tant, és capaç de comportar-se com a fre.



**Il·lustració 46. Detall de la il·lustració 53 on es veuen el parell de les fases, el parell total i el parell mig que exerceix el motor en mode generador.**

Amb els paràmetres establerts per a fer aquest anàlisi, es pot veure com el motor exerceix un parell mig de frenada de 6,73 Nm.

Pel que fa al corrent que circula per les fases del motor quan es comporta com a generador, podem veure el següent gràfic:



**Il·lustració 47. Detall del corrent total i el corrent mig que proporciona el motor.**

Es pot veure al gràfic que quan el motor treballa en les condicions indicades, és capaç de retornar a les bateries un corrent de 4,05 A de mitjana a través del bus de continua. Així doncs, el fet de que el motor funcioni com a fre de la bicicleta i a la vegada com a generador permet un retorn de corrent a la bateria que farà que hi hagi un estalvi energètic considerable durant el seu funcionament.



## 9. Estudi sobre la reducció de les dimensions del motor

Per tal de veure si és viable la construcció del mateix tipus de motor amb un diàmetre menor per tal d'estalviar costos de materials, i reduir el pes del producte, s'ha volgut fer un estudi mitjançant el qual es proposa exactament el mateix tipus de motor, amb el mateix disseny i els mateixos materials però reduint a la meitat el diàmetre d'aquest.

Per a fer-ho s'han adequat tots els paràmetres característics del motor, s'han adaptat els guixos dels pols, de les corones, i el nombre d'espores que s'inseriran a l'espai dedicat a aquestes, per tal de treure'n el màxim profit i obtenir els millors resultats possibles.

Així doncs, es vol fer l'anàlisi estàtic de la nova estructura desenvolupada per comprovar si els resultats que s'obtenen d'aquest són bons. I si s'escau, a continuació fer l'assaig dinàmic.

### 9.1. Anàlisi estàtic del nou disseny de motor

Un cop s'ha dimensionat de nou la figura del motor, s'ha procedit a fer l'anàlisi estàtic de la figura per mitjà del programa FEMM, com s'ha fet en tots els estudis anteriors.

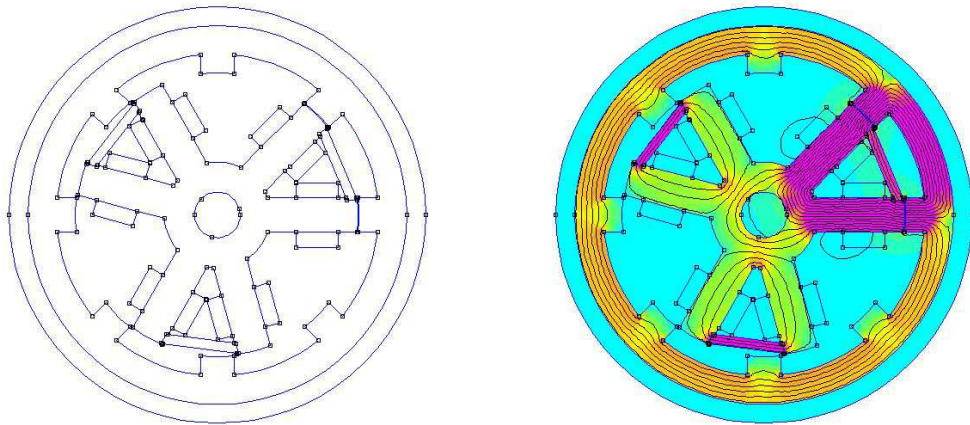
Gracies a això, s'han obtingut les gràfiques que indiquen quin és el parell que genera el motor durant el seu angle de pas, el flux que és capaç de generar en funció de l'angle de gir d'aquest, i el flux en funció del corrent que absorbeix.

La taula de característiques mostra les noves mesures d'aquest dimensionament del motor és la següent:

<b>Número de pols a l'estator</b>	6
<b>Número de pols al rotor</b>	8
<b>Número de fases</b>	3
<b>Diàmetre exterior</b>	110 mm
<b>Gruix general</b>	50 mm
<b>Amplada de pols del rotor</b>	9 mm
<b>Amplada de pols de l'estator</b>	9 mm
<b>Stroke (angle de pas)</b>	45°
<b>Nombre d'espores a cada pol</b>	70

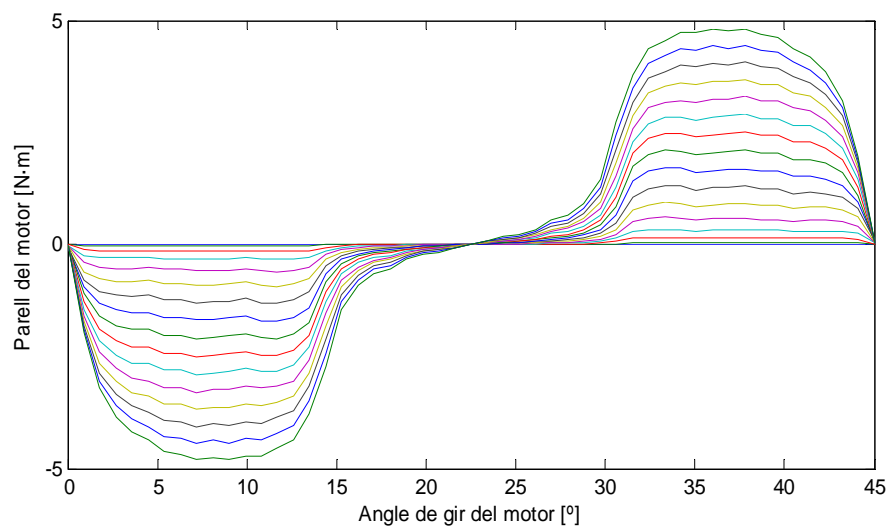
Taula 22. Característiques del prototip de motor amb un diàmetre de la meitat de l'original

I el prototip del motor és aquest:



Il·lustració 48. Esquerra; dibuix del model de motor petit.  
Dreta; anàlisi de l'estructura mitjançant el programa FEMM.

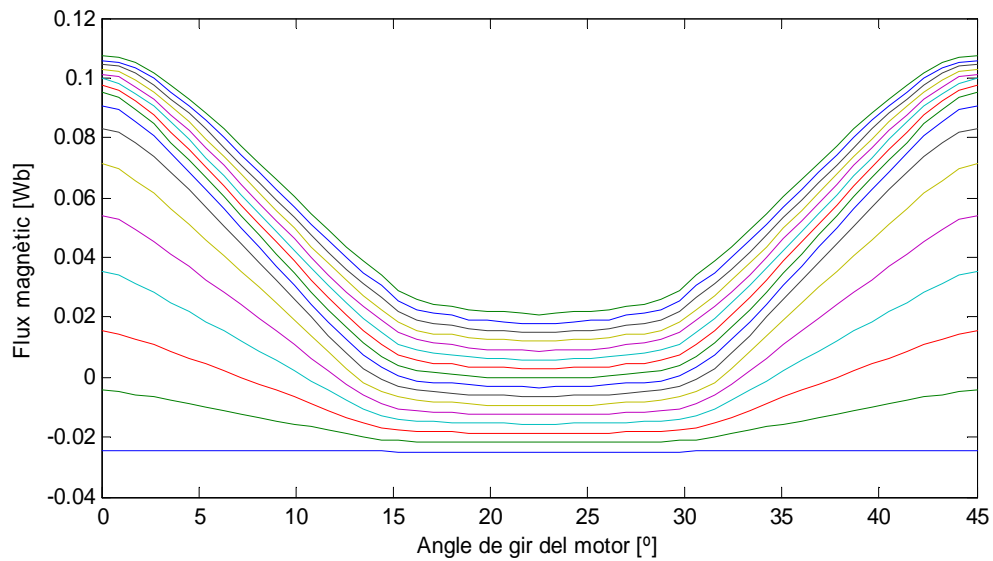
Pel que fa al parell que genera aquest motor, podem obtenir el següent gràfic de com evoluciona al llarg de l'angle de pas:



Gràfica 35. Representació del parell segons l'angle de posició  
del rotor i per a cada corrent determinat a l'ANNEX B

Es pot veure de forma clara com l'ona de parell que és capaç de generar el motor no arriba en el seu valor màxim als 5 Nm. Això fa pensar que aquest motor pot quedar-se lluny de les expectatives i no acomplir amb el que es vol.

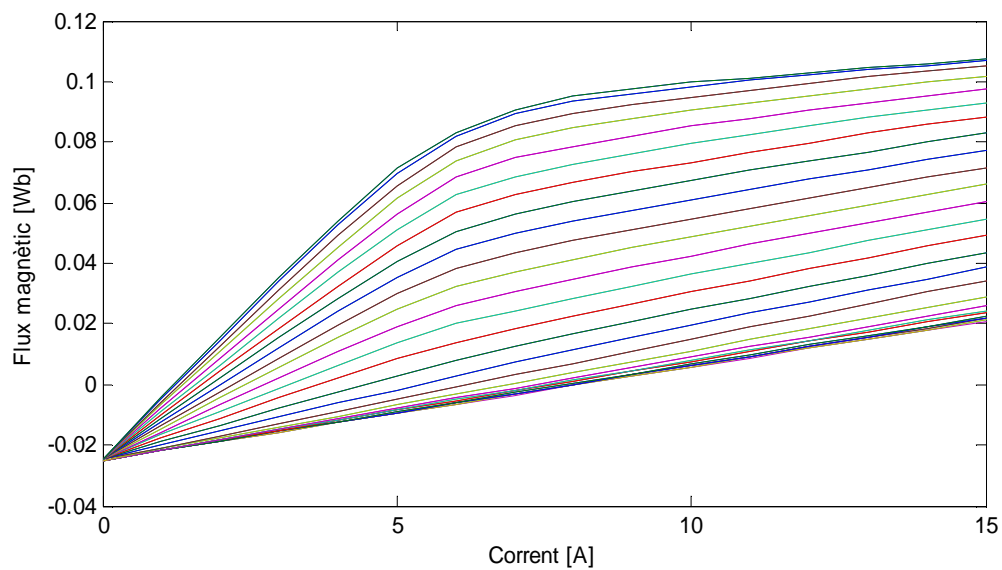
Pel que fa al flux magnètic del motor, es pot veure com va variant mentre aquest gira durant un angle de pas:



Gràfica 36. Representació del flux segons l'angle de posició del rotor i per a cada corrent determinat a l'ANNEX B

S'observa com la variació del flux magnètic tot i existir, és molt petita; i això és el que fa que el parell que és capaç de generar el motor no sigui molt gran. A banda, s'observa una zona on de forma molt clara no hi ha variació de flux, i per tant no genera parell. Això fa que es posi en dubte l'eficiència d'aquest motor.

Per últim, la gràfica de flux magnètic en funció del corrent és:



**Gràfica 37. Representació del flux segons el corrent  
i per a cada angle determinat a l'ANNEX B**

On es veu de forma clara l'àrea que representa la coenergia capaç d'entregar el motor entre la posició alineada i la no alineada, i com aquesta no és tan gran com ho era en el model original. Així doncs, queda clar que aquesta modificació de tamany implementada al motor no és capaç de proporcionar valors de parell similars als obtinguts anteriorment.

Es decideix doncs que ni tan sols es farà un assaig dinàmic del motor, ja que amb el parell obtingut de l'anàlisi estàtic queda clar que el parell que proporciona el motor en l'anàlisi dinàmic serà clarament menor al del prototip original, i que molt difícilment podrà treballar com a generador i retornar corrent.

A tall de conclusions comentar que, amb aquest anàlisi queda palès que el motor dissenyat amb aquest diàmetre no és el més idoni per al que es vol. El seu disseny no permet un nombre d'espores elevat, ja que el nou tamany, més reduït no ho fa possible. Per tant, amb aquest nombre menor d'espores, i un guix del pol molt menor que en el cas anterior, el flux de corrent concatenat que genera la força magnetomotriu no és suficient per generar un parell que faci girar el motor amb la suficient força. Per tant el parell que donarà aquest nou motor no serà molt elevat i el seu rendiment tampoc.

## 10. Viabilitat del motor dissenyat

Es vol comprovar de forma clara si el motor dissenyat dona millors resultats o no que el que es va dissenyar en el projecte que precedeix aquest i que el contextualitzava dins un sistema que simulava el pedaleig assistit d'una bicicleta.

Així doncs, per a conèixer i comparar correctament el motor dissenyat en el projecte '*Estudi de la viabilitat de l'ús d'un motor generador en el desenvolupament de bicicletes elèctriques*' amb el que desenvolupa aquest projecte, s'ha realitzat el mateixos assajos, mantenint sempre els mateixos criteris que s'han mantingut en el present treball. I utilitzant el mateix programa de simulació que s'ha fet servir durant tots els apartats que fan referència a la simulació tant en mode motor com en mode generador.

S'ha començat amb l'assaig en mode motor i s'ha seguit amb l'assaig en mode generador per tal de poder veure si hi ha millores en tots els aspectes.

### 10.1. Assaig en mode motor

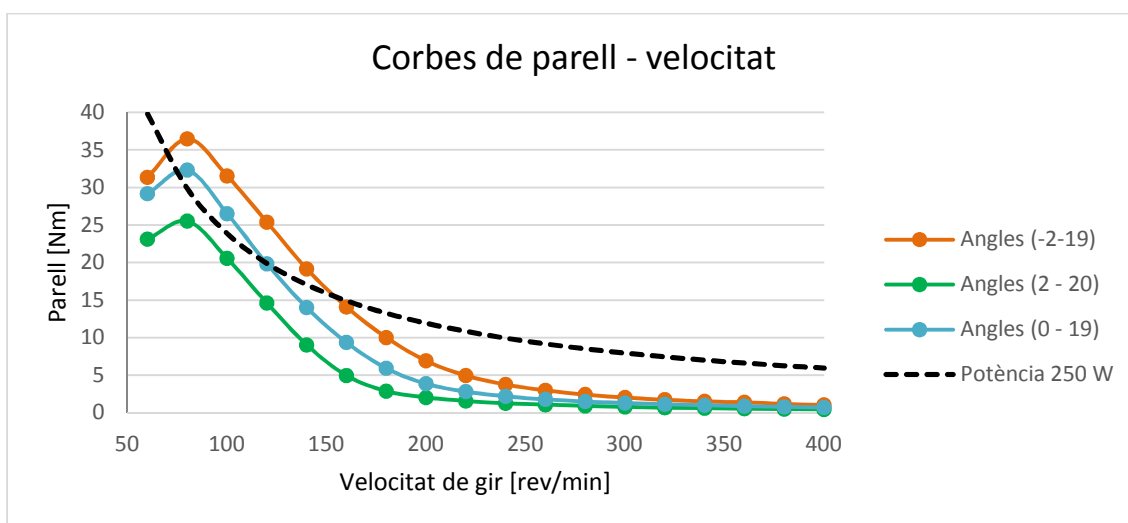
En aquest assaig s'ha pogut veure quin parell entrega el motor, i quin és el seu rendiment, funcionant en les següents condicions:

Angles de dispar: -2 i 19 graus, 2 i 20 graus, i 0 i 19 graus.

Rang de velocitats: entre 60 i 400  $\text{min}^{-1}$ .

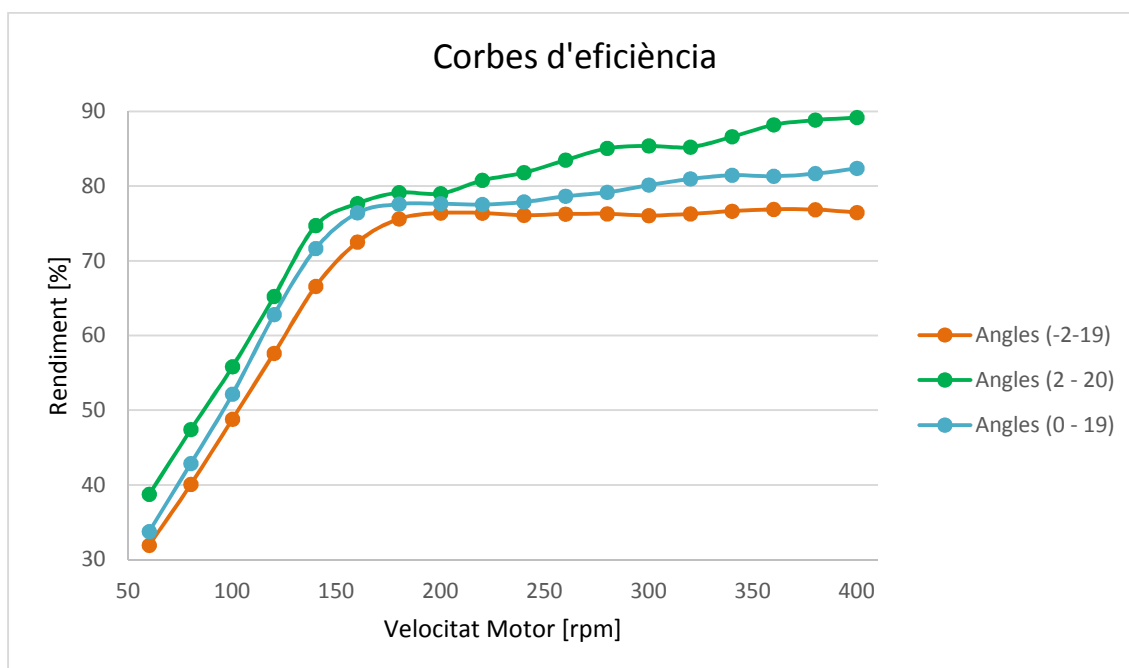
Tipus de control: pols únic.

El gràfic de la corba parell velocitat amb els resultats de l'assaig és el següent:



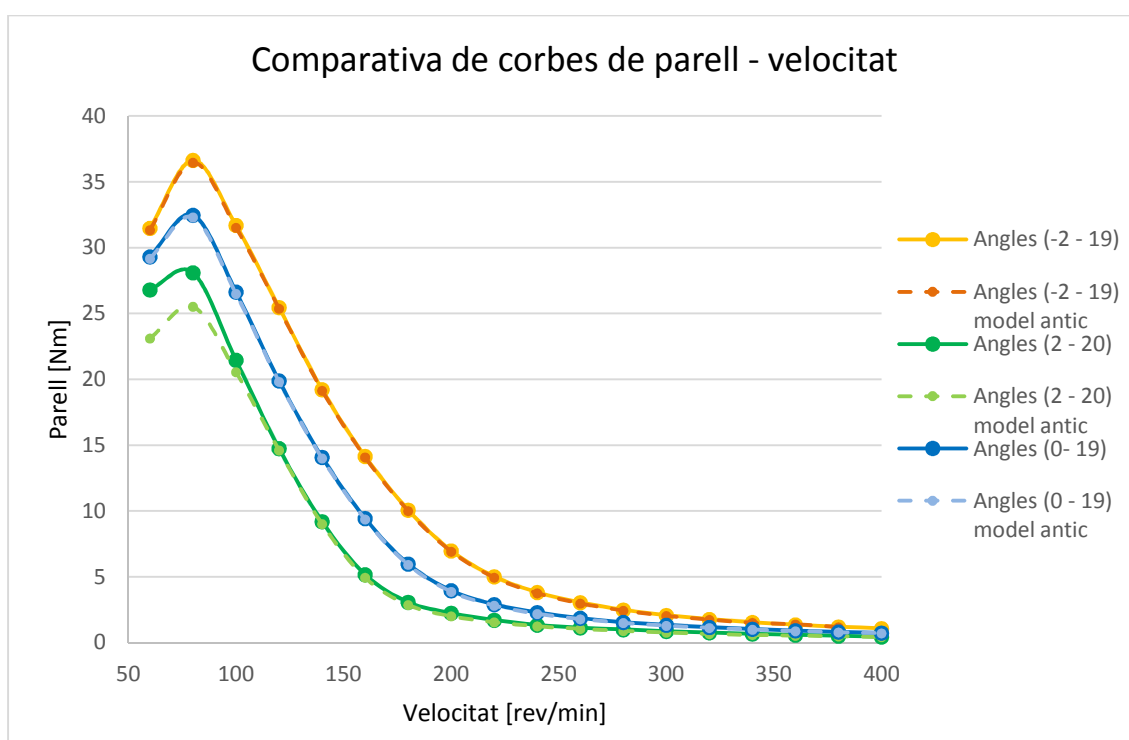
Gràfica 38. Representació del parell en funció de la velocitat del motor

I el que mostra el rendiment en el mateix rang de velocitats:

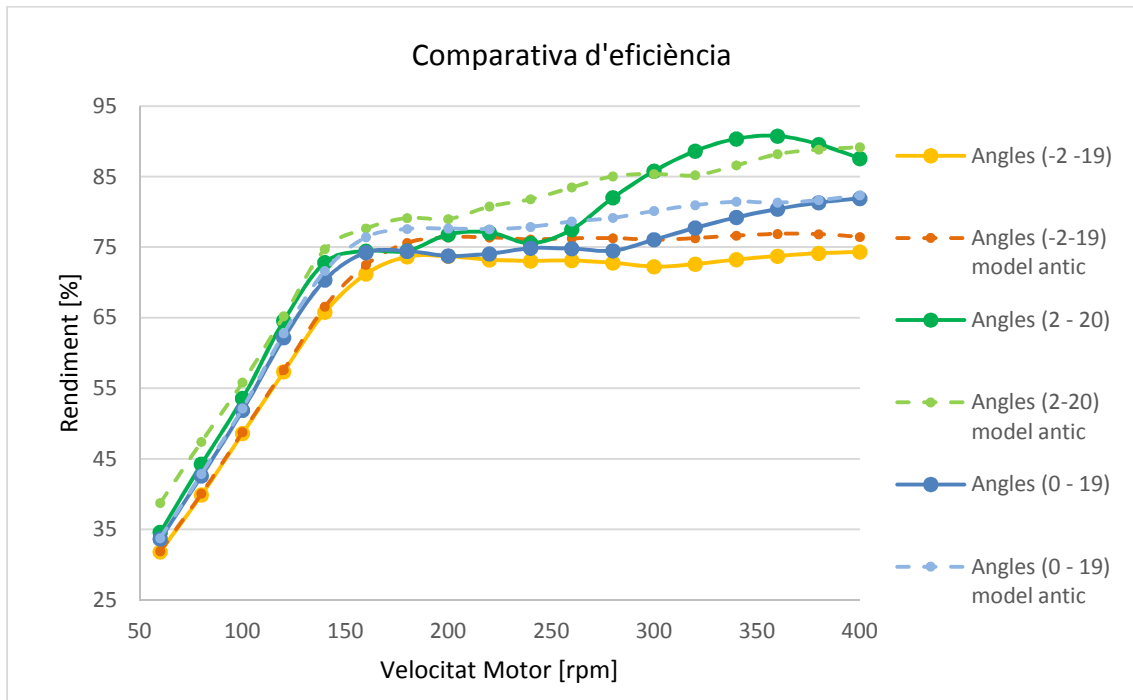


Gràfica 39. Representació del parell en funció de la velocitat del motor

Així doncs, amb aquests resultats es pot comparar si el nou motor és millor que l'antic en tant que doni resultats més òptims.



Gràfica 40. Representació les corbes de parell en funció de la velocitat per als dos models de motor que es volen comparar.



Gràfica 41. Representació les corbes d'eficiència en funció de la velocitat per als dos models de motor que es volen comparar.

Veient aquest dos gràfics es pot veure de forma clara com el parell que generen un motor i l'altre són molt similars. Per altre banda, i pel que fa a l'eficiència, destaca el fet que el model de motor més antic sembla una mica més eficient, però només en els rangs més grans de velocitats. Per a les velocitats més baixes l'eficiència és molt semblant en els dos casos.

## 10.2. Assaig en mode generador

Tot seguit es procedeix a fer l'anàlisi dinàmic del motor 'antic' per tal de veure quin són els seus resultats i quina resposta dona quan s'assaja en les mateixes condicions que el motor que s'ha desenvolupat, i veure quina és la seva resposta.

Interessa veure quin parell de frenada desenvolupa, quina quantitat de corrent és capaç de retornar al sistema, i quin és el seu grau d'eficiència.

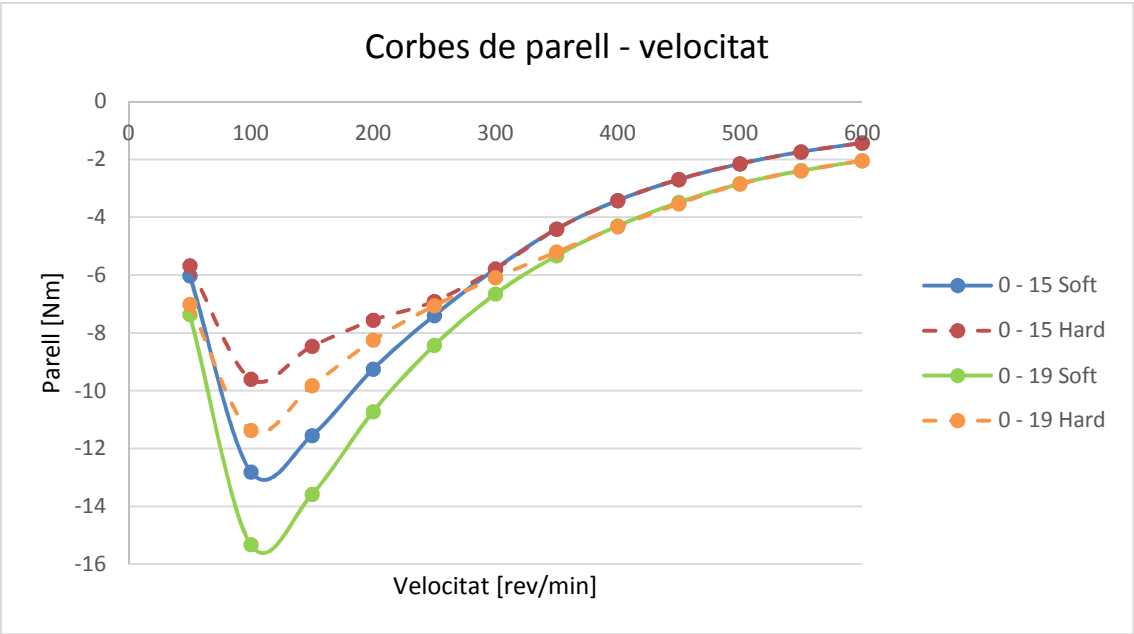
Les condicions de l'estudi són les següents:

Angles de dispar: -2 i 19 graus, 2 i 20 graus, i 0 i 19 graus.

Rang de velocitats: entre 60 i 400  $\text{min}^{-1}$ .

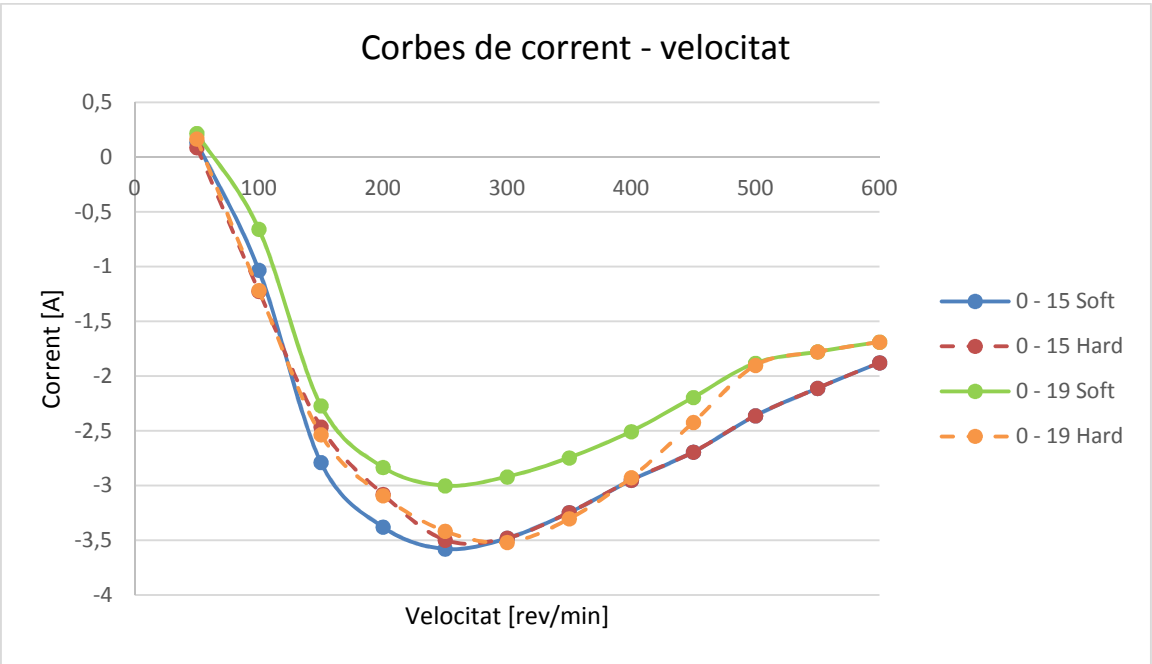
Tipus de control: control de corrent a 10A, i pels dos sistemes de control de la commutació (Softchopping i Hardchopping).

Es mostren en primer lloc les corbes de parell velocitat:



Gràfica 42. Representació del parell en funció de la velocitat del motor

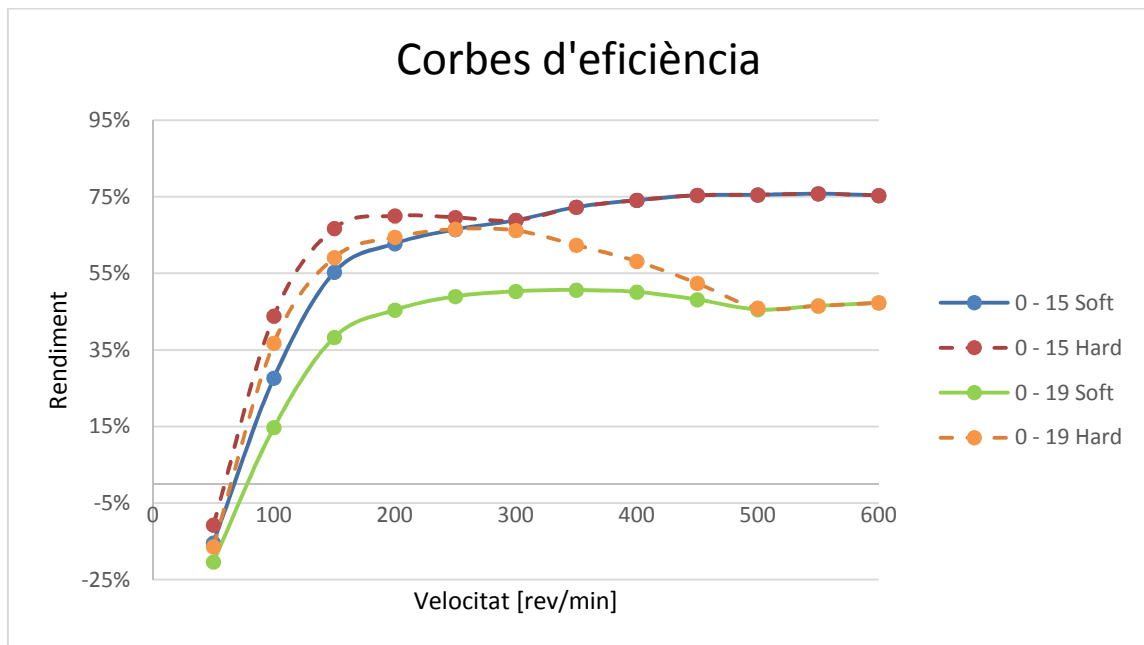
Seguidament les corbes de corrent velocitat:



Gràfica 43. Representació del corrent en funció de la velocitat del motor



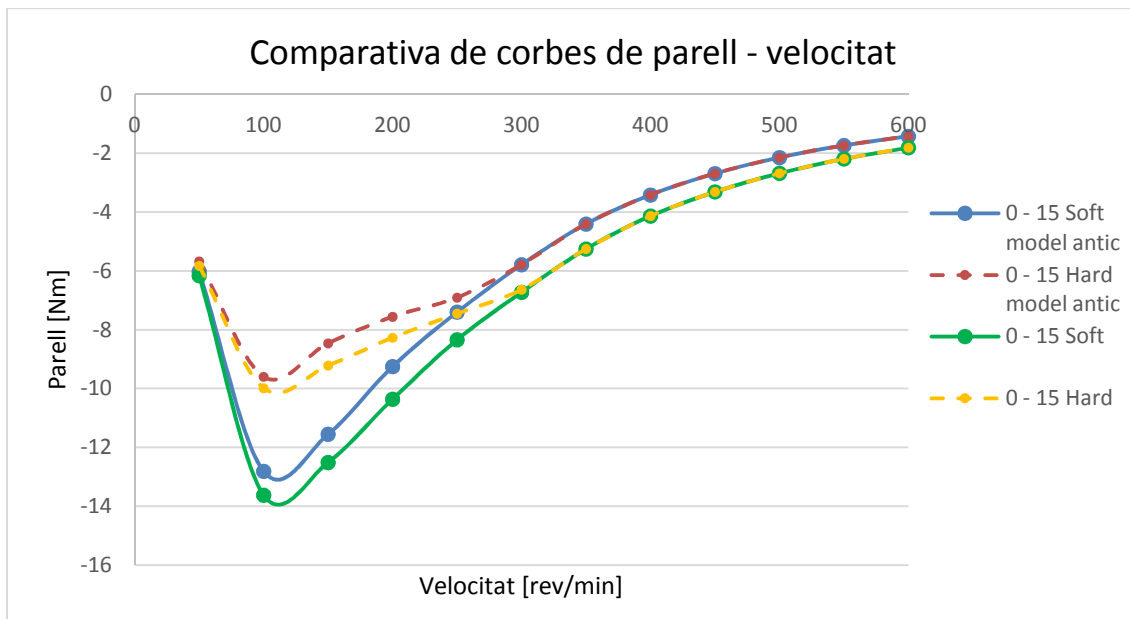
I per últim, les corbes d'eficiència:



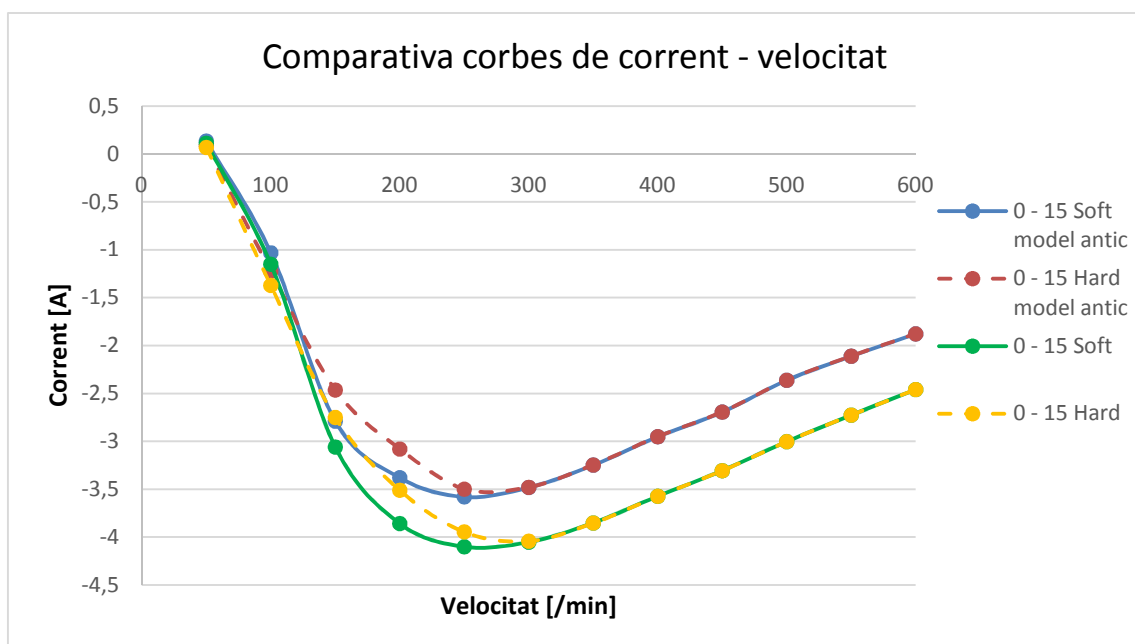
Gràfica 44. Representació del rendiment en funció de la velocitat del motor

Es compara doncs a continuació el resultat obtingut d'aquestes simulacions amb l'anàlisi extret dels mateixos assajos del prototip de motor desenvolupat i millorat.

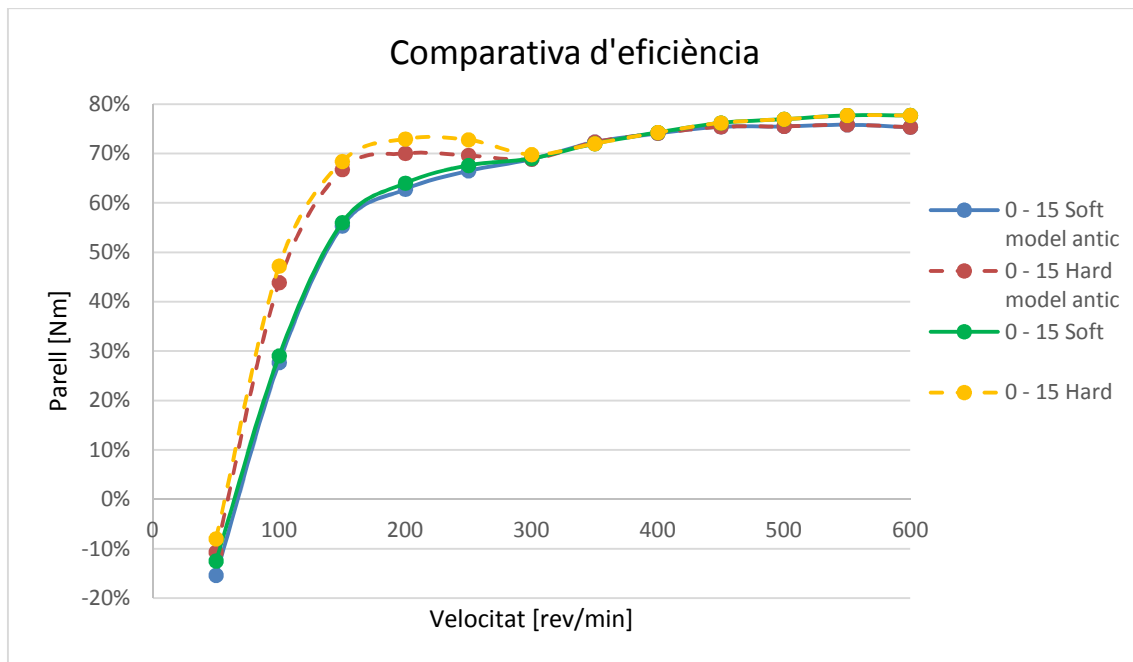
Els resultats que s'obtenen són els següents pel que fa al parell de frenada, al retorn de corrent i a l'eficiència:



Gràfica 45. Comparació de les corbes de parell en funció de la velocitat de gir del motor funcionant en mode generador.



Gràfica 46. Comparació de les corbes de corrent en funció de la velocitat de gir del motor funcionant en mode generador.



Gràfica 47. Comparació de les corbes d'eficiència en funció de la velocitat de gir del motor funcionant en mode generador.

Com es pot veure si s'analitzen els tres gràfics que s'acaben de presentar, on es veuen clarament les dues opcions de motor que es vol comparar quan el seu funcionament és en mode generador, es poden treure les següents conclusions:

En primer lloc s'observa com el motor dissenyat és capaç de donar un parell de frenada lleugerament superior al del model antic, fet no gens menyspreable.

Per altre banda, pel que fa al corrent que és capaç de retornar el motor quan treballa en mode generador, es pot veure al gràfic com aquests valors de corrents són més elevats i durant un rang de velocitats més gran en el cas del nou disseny de motor. Aquest fet serà determinant pel que fa a l'estalvi i a la regeneració d'energia, fent que el motor dissenyat sigui un element força sostenible pel seu ús.

Per últim, cal destacar que l'eficiència de tots dos motors pel que fa al seu rendiment i treballant a mode generador és molt similar en tots dos casos.

### 10.3. Conclusions sobre la viabilitat del motor

Al llarg d'aquest apartat s'ha vist com el nou disseny de motor que s'ha desenvolupat durant la realització d'aquest projecte és capaç d'aportar noves millores al model prototip que existia del TFG que precedeix a aquest.

En el moment en que treballa com a motor, val a dir, que no hi ha un augment destacable ni de parell generat per aquest ni de l'eficiència a l'hora de treballar. El parell és manté molt similar en tots els rangs de velocitat i l'eficiència depenent de la velocitat de gir mostra uns millors o pitjors resultats.

En canvi, és en el moment en que treballa com a generador quan es veuen els clars avantatges d'aquest motor respecte l'anterior. Es pot veure com girant a la mateixa velocitat és capaç de recuperar un 25% més de corrent, cosa que el converteix en un motor més sostenible. A part, també s'ha vist que el parell de frenada és lleugerament superior, i per tant, podrà ajudar més a l'usuari a reduir la velocitat de la bicicleta sense que aquest hagi de fer un ús continuat dels frens del vehicle.

A banda, constructivament, s'ha vist que aquest motor aporta una estructura més sòlida i menys fràgil dins l'estator del motor, que ve a causa de l'augment de la distància de la juntura dels pols amb l'eix de la bicicleta, i aquest fet és molt valorable ja que l'estructura del motor i la seva solidesa és quelcom essencial per al seu bon funcionament i la seva durabilitat.

Així doncs, es pot afirmar que el nou disseny aporta millores al que el precedeix i que és capaç de proporcionar una millor solució pel que fa a eficiència i a la seva vida útil.

## 11. Conclusions

La feina realitzada en aquest projecte ha donat lloc a moltes conclusions les quals es resumeixen tot seguit:

S'ha estudiat el mercat de la bicicleta elèctrica, s'ha vist quins són els paràmetres que afecten al motor i a la part en la qual es focalitza el treball, el seu disseny. Molts aspectes concrets com ara la tensió deriven de les bateries actuals, però en un futur pròxim aquestes bateries poden patir molts canvis deguts a la introducció de nous materials i millors tecnologies. Aquests elements farien replantejar el projecte ja que aquest està destinat a solucionar una de les mancances més grans per a l'usuari, que és la durada de la bateria. Com que ara el que priva és l'autonomia, el que volem és regenerar el màxim possible l'energia sobrant del sistema.

Després d'estudiar tots aquests factors, i veure com estan relacionats entre ells, això ha donat lloc a una línia de treball en la que es té en compte l'autonomia, la possibilitat de que l'usuari pugui recarregar-la durant alguns trajectes, i per tant que el motor pugui funcionar com a generador. L'estudi dels motors que utilitzen les bicicletes elèctriques ha ajudat a definir que el tipus de motor més idoni per a fer-ho és un HRM, ja que facilitarà de forma notable la tasca d'aprofitament de l'energia sobrant del sistema que conformen l'usuari i la bicicleta gràcies als imans que conformen una part essencial de la seva estructura ferromagnètica.

El model que dona millors resultats, després de realitzar l'anàlisi estàtic, que s'ha dut a terme mitjançant el mètode d'elements finits, és un bon candidat per a funcionar com a motor per a la bicicleta elèctrica i és capaç de generar energia.

Els assajos estàtics han donat lloc a diverses conclusions molt lligades al disseny del motor, i que fan referència a la seva forma constructiva i a diferents elements que el componen. En primer lloc, es conclou que un model de fases dobles tot i reduir les vibracions del motor, no generarà millor parell que un model amb fases simples. En segon lloc s'ha pogut veure com a l'augmentar el nombre d'espores de les bobines del motor s'ha aconseguit que aquest entregui un major parell. En tercer lloc, l'amplada dels pols juga un paper essencial en la construcció del motor, ja que com més amples són menys espai hi ha per a les espores del bobinat, i com menys estrets són més possibilitats hi ha de que se sature el flux magnètic. En quart lloc, el fet d'ampliar l'àrea de la corona que envolta l'eix del motor ha suposat millores en quant a robustesa del motor i millor circulació del flux esmentat. I per últim, el fet d'augmentar la profunditat del motor fa que aquest sigui capaç d'entregar un parell superior.

El programa utilitzat en *Matlab Simulink* per l'estudi dinàmic, ha permès representar el moviment del motor i el seu control en totes les formes de treball, i poder extreure les dades que han ajudat a obtenir les seves corbes de parell velocitat i d'eficiència, claus per a determinar quin model de motor és més idoni per a funcionar com a motor i com a generador. Aquest programa, pot modificar característiques i fer els assajos de forma correcta, ja que permet variar els modes de control, els angles de dispar i el tipus de commutació de la controladora amb tots els models de motor que s'ha volgut estudiar.

Les conclusions d'aquests assajos són doncs, que el motor escollit port ser perfectament útil per a realitzar la tasca, i que és capaç de generar energia quan funciona com a generador, cosa que el converteix en un motor sostenible i eficient. Els punts òptims de treball del motor són amb uns angles de dispar de 2 i 20° i amb un control de pols únic, que donarà lloc a un motor que donarà un parell just per sota del límit que estableix la normativa i el més eficient possible. Per altre banda, quan funciona com a generador, el punt de màxima generació de corrent es dona amb un control de corrent a 10 A amb commutació Softchopping i uns angles de dispar 0 i 15°, en un rang de velocitats que va de les 150 a les 500  $\text{min}^{-1}$ .

Utilitzant com a base un motor dissenyat prèviament s'ha realitzat una sèrie d'assajos per determinar les característiques d'altres propostes arribant a una optimització dels següents aspectes:

- Millora en el parell de frenada
- Millora en la generació de corrent
- Millora en l'eficiència quan es treballa com a generador
- Millora en l'estructura mecànica del motor: més resistència als impactes i els cops, i més robustesa.

Així doncs, es donen per complerts els objectius d'aquest Treball Final de Grau que eren entre d'altres estudiar la possibilitat de millorar un tipus de motor que fos ideal per a fer d'una bicicleta elèctrica un mitjà més sostenible i eficient, i que l'usuari se'n veiés beneficiat de forma clara tot allargant l'ús de la seva bateria, ja que és un dels handicaps de l'ús d'aquest tipus de vehicles actualment.

A més, s'ha aconseguit aprendre a integrar tots els elements d'un accionament, ajudant-nos d'eines de simulació que ens permetin comprendre com funcionen aquest tipus de motors i com es poden optimitzar; i això ha permès seguir endavant amb el projecte.

## 12. Futures línies de treball

Després de la feina feta durant el projecte, es volen presentar diferents propostes o línies de treball que ajudaran a implementar una millora del producte o a facilitar una tasca que estigui directament relacionada en la millora del seu disseny i/o desenvolupament.

Les diverses propostes que poden despertar interès en el futur i que estan directament relacionades amb aquest projecte són:

- La realització d'un anàlisi exhaustiu dels materials més idonis per al motor dissenyat en aquest projecte, per tal de millorar la seva eficiència i treure'n més profit.
- La realització d'assajos i comprovacions reals de l'espai dedicat a les bobines del motor, tècniques de millora, tipus de bobinats, i materials conductors per a les espines.
- L'estudi dels dimensionaments de l'entreferro del motor, realització d'assajos reals. Es pot veure com afecta el seu dimensionament, com afecten les vibracions al seu comportament, i possibles solucions.
- Anàlisi de les pèrdues reals d'aquest motor, possibles solucions i millores a aplicar per tal de reduir-les al màxim.
- Confecció d'un software que permeti de forma senzilla extreure les dades del simulador dinàmic del motor i exportar-les de forma fàcil, sense que això es converteixi en una tasca feixuga, per a un anàlisi de dades més còmode i eficient. Important trobar un mètode senzill per a treure dades *d'elements finits* cap a simulink (simplificar el procés).
- Creació d'un prototip de motor HRM per a l'aplicació i realització d'assajos per a obtenir dades reals del seu comportament i comprovar la seva viabilitat i bon funcionament. Anàlisi de costos de la producció d'aquest tipus de motor i viabilitat al mercat actual.

Altres aportacions interessants podrien ser:

- Integració de la proposta de motor i del seu sistema de control, a nivell de prototip, compatible per a diferents models de bicicletes i comprovar el comportament mitjançant tot tipus d'assajos i proves, amb l'objectiu de validar la simulació.
- Confecció d'un sistema de control de la bicicleta que faciliti a l'usuari la decisió de millorar el parell que obtingui del motor en el moment que ell ho desitgi. Aquest mateix control hauria de permetre la regeneració d'energia cap a la bateria del sistema i potenciar-ne l'eficiència i la durada de la seva descàrrega fent que sigui possible un

recorregut més llarg sense que aquesta s'esgoti. També es pot treballar en que sigui automàtic i les decisions siguin preses per la controladora.

- Disseny d'un control de mode d'assistència basat en la localització GPS i que en funció del pendent rel recorregut pugui assistir en major grau a l'usuari sense que aquest hagi de fer cap tipus d'indicació.
- Estudi de l'aplicació d'aquest tipus de motors en altres sistemes de transport, com ara cadires de rodes, per a facilitar el control de la frenada en pendent i regenerar energia, o *Segways*, per tal de millorar la seva eficiència.
- Creació i implementació d'una xarxa de transport públic basat en e-bikes que utilitzin aquest tipus de motor sostenible. O fins i tot, creació d'una xarxa de rutes turístiques en bicicleta on s'hi pugui fer servir aquest tipus de bicicleta elèctrica, es promogui el turisme interior i es faciliti el seu ús.
- Potenciar la salut i el benestar desenvolupant un sistema que s'adeqüi més a les persones d'edat avançada per tal que puguin fer exercici de forma agradable i sense que els suposi grans esforços físics, tot controlant les pulsacions i esforç per poder anar millorant l'estat físic sense produir lesions.



### 13. Pressupost

Aquest apartat té com a objectiu estudiar quin cost té la tasca realitzada en aquest projecte tenint en compte que s'ha arribat a definir un disseny de motor que serà capaç de funcionar com a generador i retornar energia. Així doncs, es tindrà en compte totes les accions que s'han dut a terme, el temps que ha comportat fer-les i si han suposat algun cost afegit.

Els conceptes que s'han tingut en compte com a tasques realitzades són els següents: l'anàlisi de la demanda, l'enfocament de la solució, la idea inicial del producte, la optimització del disseny del motor, les comprovacions del funcionament, les correccions i millores a aplicar, els nous estudis del funcionament i l'estudi de viabilitat del motor.

En primer lloc es calcula el temps que ha comportat realitzar cada una d'aquestes tasques i després el multiplicarà pel preu/hora del servei del professional especialitzat en realitzar la feina. Es té en compte que qui realitza la tasca és un professional ben preparat per aquesta feina i que no necessita d'un període d'aprenentatge. Per altre banda el cost d'aquest professional és molt més car que no pas el d'un estudiant en pràctiques, que per altre banda pot no tenir tanta experiència en aquest tipus de feines i trigar més en realitzar-les.

Una manera de potenciar estalvis podria ser la de combinar la feina realitzada per l'enginyeria, de manera que aquesta sigui feta per un becari (amb un cost menor) i per un enginyer especialitzat en la matèria. De manera que es reduirien les hores de l'enginyer expert en realitzar les tasques més senzilles, i per tant el cost, i s'augmentarien hores de becari, que són una quarta part més econòmiques que les d'un enginyer ja format.

En finalitzar el sumatori d'hores i preu, s'afegirà un marge que serveix per a cobrir els costos derivats del manteniment dels equips informàtics, els softwares corresponents i les seves llicències, el personal d'administració, la llum, l'aigua i el lloguer del local.

Es suma el total de conceptes i el marge calculat (30% dels costos) i per últim s'afegeix l'impost sobre el valor afegit (IVA del 21%), i finalment s'obté el total del pressupost.

El resum queda de la següent manera:

Concepte	Hores	Preu/hora	Cost
<i>Anàlisi de la demanda</i>	16	40,00 €	640,00 €
<i>Enfocament de la solució</i>	12	40,00 €	480,00 €
<i>Idea inicial</i>	16	40,00 €	640,00 €
<i>Optimització del disseny del motor</i>	80	40,00 €	3.200,00 €

<i>Correccions i millores aplicades</i>	16	40,00 €	640,00 €
<i>Comprovacions del funcionament del motor</i>	24	40,00 €	960,00 €
<i>Estudi de viabilitat</i>	16	40,00 €	640,00 €
Sumatori de conceptes			7.200,00 €
<i>Marge a carregar*</i>		30%	2.160,00 €
*Cobreix els costos d'equips informàtics, softwares, llicències, personal d'administració, llum, aigua i lloguer del local.	PVP		9.360,00 €
	IVA		1.965,60 €
	<b>TOTAL</b>		<b>11.325,60 €</b>

**Taula 23. Pressupost per a la realització del projecte del treball.**

Així doncs, el pressupost per a la realització del projecte suposarà un cost d'11.325,60 €.

## 14. Bibliografía

### Bibliografía:

[BLA01] Blanqué Molina, B. *Simulación interactiva de motores de reluctancia autoconmutados*. Tesis Doctoral -Director: Andrada Gascón, P. Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2007.

[MEC01] Jiménez Díaz, J.F. ; Terrados Cepeda, N. ; Villa Vicente, G. ; Manonelles Marqueta, P. *Medicina y Fisiología del Ciclismo. Tomo I*. Nexus Médica Editores, 2009.

[NOR01] Normativa: UNE-EN 15194:2009+A1:2012

[MOT01] Husain, I. *Electric and hybrid vehicles. Design fundamentals. Second Edition*. CRC Press, 2011.

[MOT02] Ehsani, M. ; Gao, Y. ; Emadi, A. *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles. Second Edition*. CRC Press, 2010.

### Webgrafía:

[BIK01] Sduro Hardseven sl <http://www.kvolt.es/catalogo/haibike/sduro-hardseven-sl-2015/7-427> (consultada al diciembre de 2014)

[BIK02] Rubbee e-bike kit <http://www.rubbee.co.uk/> (consultada al diciembre de 2014)

[BIK03] Copenhagen wheel, MIT <http://senseable.mit.edu/copenhagenwheel/> (consultada al diciembre de 2014)

[BIK04] Coboc e-bike <http://www.coboc.biz/> (consultada al diciembre de 2014)

[BIK05] Mandofootloosse e-bike <http://www.mandofootloose.com/eng/product/vr.asp> (consultada al diciembre de 2014)

[BIK06] Wooden e-bike <http://bicycledesign.net/2014/01/wooden-e-bike-by-kasper-de-backer/> (consultada al diciembre de 2014)

[BIK07] Faraday e-bike <http://www.faradaybikes.com/products/faraday-porteur>  
(consultada al desembre de 2014)

[BIK08] 2.0 e-bike <http://www.en-derin.com/technology/bike-2-0-next-generation-bicycle-with-chainless-transmission> (consultada al desembre de 2014)

[BIK09] Gi e-bike <http://www.gibike.com/> (consultada al desembre de 2014)

[BIK10] HMK 561 e-bike <http://www.yankodesign.com/2010/03/11/advance-carbon-fiber-electric-bike/> (consultada al desembre de 2014)

[BIK11] Volkswagen e-bike  
<http://www.blessthisstuff.com/stuff/vehicles/cycles/volkswagen-folding-electric-bike/>  
(consultada al desembre de 2014)

[BIK12] EBIQ e-bike <http://www.coroflot.com/YujiFujimura/Concept> (consultada al desembre de 2014)

[BIK13] Ele Solar e-bike <http://www.yankodesign.com/2013/10/29/love-this-solar-bike/> (consultada al desembre de 2014)

[BIK14] Apollo e-bike <http://www.tuvie.com/apollo-e-bike-folding-bike-designed-for-daily-urban-use/> (consultada al desembre de 2014)

[BIK15] MoDe:Me i MoDe:Pro de Ford  
<https://media.ford.com/content/fordmedia/fna/us/en/news/2015/03/02/ford-smart-mobility-plan-expanded-at-mobile-world-congress.html> (consultada al desembre de 2014)

[BIK16] Visiobike <http://www.motorpasionfuturo.com/categoria/bicicletas-electricas>  
(consultada al desembre de 2014)

[MEC02] Relació de transmissió entre la cadència del ciclista i la velocitat de la bicicleta <http://www.granabike.com/consejos/medidas/354-desarrollo-btt.html>  
(consultada al gener de 2015)

## 15. Llistat d'abreviatures i símbols

A; Ampers	I; Intensitat
AC; Altern current (corrent alterna)	J; Joules
$A_f$ ; Àrea frontal	kg; Quilogram
Ah; Ampers hora	km; Quilòmetre
$C_d$ ; Coeficient d'arrossegament	L; Longitud
cm; Centímetres	Li; Liti
d; Distància	m; Metres
dB; Decibels	M; Parell
DC; Direct current (corrent contínua)	min; Minut o minuts
deg; Degrees (graus)	mm; mil·límetres
E; Energia	N; Newtons
F; Força	O; Oxigen
$F_d$ ; Força d'arrossegament	OFF; desconexió o apagada (interruptor sense conduir corrent)
Fe; Ferro	ON; encesa o engegada (interruptor conduint corrent)
$F_{fr}$ ; Força de fregament	P; Potència
$F_g$ ; Força de gravetat	PH; Phase (fase)
f.; Freqüència	R; Radi
g; Gravetat	rad; Radians
h; Hora	
Hz; Herz	

## 16. Índex d'il·lustracions, taules i gràfiques

### 16.1. Índex d'il·lustracions

Il·lustració 1. Esquema de la metodologia àgil <i>SCRUM</i> .....	15
Il·lustració 2. SDURO HARDSEVEN SL .....	18
Il·lustració 3. Kit per a conversió e-Bike Rubbee.....	19
Il·lustració 4. Roda Copenhagen.....	19
Il·lustració 5. Coboc eCycle.....	20
Il·lustració 6. 3D VR. Primera e-bike plegable sense cadenes.....	20
Il·lustració 7. Wooden e-bike .....	21
Il·lustració 8. Faraday Porteur.....	21
Il·lustració 9. Bike 2.0. Bicicleta elèctrica sense cadenes.....	22
Il·lustració 10. Bicicleta elèctrica plegable Gi e-bike .....	22
Il·lustració 11. Bicicleta elèctrica de fibra de carboni HMK 561.....	23
Il·lustració 12. Bicicleta elèctrica plegable Volkswagen.....	23
Il·lustració 13. Concepte de bicicleta elèctrica EBIQ.....	24
Il·lustració 14. Bicicleta elèctrica proveïda de panells solars Ele Solar Bicycle .....	24
Il·lustració 15. Bicicleta elèctrica plegable que es recarrega amb energia solar per mitjà d'un centre de mobilitat sostenible. ....	25
Il·lustració 16. E-bike de MoDe:Me de la casa de vehicles FORD. ....	25
Il·lustració 17. Representació de la força exercida en un cicle de pedaleig d'una persona experta i d'una persona novell.....	32
Il·lustració 18. Esquema de la transmissió del moviment en una bicicleta. ....	32
Il·lustració 19. Biela solidaria amb el plat. ....	33
Il·lustració 20. Bateria escollida de la marca Eze Fat Batery.....	36
Il·lustració 21. Esquema bàsic del control d'un motor SRM.....	39

Il·lustració 22. Característica del control per histèresis.....	47
Il·lustració 23. Esquerra; dibuix del model 1 de partida per a roda gran. Dreta; anàlisi de l'estructura mitjançant el programa FEMM.....	49
Il·lustració 24. Esquerra; dibuix del model 2 de partida per a roda gran. Dreta; anàlisi de l'estructura mitjançant el programa FEMM.....	52
Il·lustració 25. Esquerra; dibuix de la primera variant del model 1. Dreta; anàlisi de l'estructura mitjançant el programa FEMM.....	56
Il·lustració 26. Detall dels pols de l'estator en posició alineada, on es veu la forma de l'iman, l'espai dedicat als bobinats i la nova amplada dels pols.....	58
Il·lustració 27. Esquerra; dibuix del prototip de partida per a roda gran. Dreta; anàlisi de l'estructura mitjançant el programa FEMM.....	59
Il·lustració 28. Esquerra; dibuix de la variant 2 del model 1. Dreta; anàlisi de l'estructura mitjançant el programa FEMM.....	63
Il·lustració 29. Esquerra; dibuix de la variant 2 del model 2. Dreta; anàlisi de l'estructura mitjançant el programa FEMM.....	68
Il·lustració 30. Esquerra; dibuix de la tercera variant del model 1. Dreta; anàlisi de l'estructura mitjançant el programa FEMM.....	73
Il·lustració 31. Esquema general del bloc de la generació lògica d'angles de dispar.....	79
Il·lustració 32. Bloc de generació d'angles de dispar .....	79
Il·lustració 33. Lògica d'angles de dispar.....	80
Il·lustració 34. Esquema general del control de parell i regulació d'histèresis.....	80
Il·lustració 35. Control de parell realitzat al motor elèctric .....	81
Il·lustració 36. Esquema general de la regulació d'histèresis.....	81
Il·lustració 37. Circuit de regulació per histèresis .....	81
Il·lustració 38. Esquema general del control lògica de dispar dels interruptors del convertidor.....	82
Il·lustració 39. Circuit lògic de dispar dels interruptors del convertidor .....	83
Il·lustració 40. Esquema general del sistema de funcionament del motor mitjançant Matlab Simulink.....	84

Il·lustració 41. Resultats de l'anàlisi dinàmic funcionant com a motor .....	92
Il·lustració 42. Detall de la il·lustració 50 del parell de les fases, el parell total i el parell mig que proporciona el motor.....	93
Il·lustració 43. Detall del parell de les fases, el parell total i el parell mig que proporciona el motor girant a <b>120 min – 1</b> amb un control de parell de 25 Nm. ....	93
Il·lustració 44. Detall del corrent de les fases, el corrent total i el corrent mig que proporciona el motor girant a <b>120 min – 1</b> amb un control de parell de 25 Nm. ....	94
Il·lustració 45. Resultats de l'anàlisi dinàmic funcionant com a generador.....	103
Il·lustració 46. Detall de la il·lustració 53 on es veuen el parell de les fases, el parell total i el parell mig que exerceix el motor en mode generador. ....	104
Il·lustració 47. Detall del corrent total i el corrent mig que proporciona el motor. ....	104
Il·lustració 48. Esquerra; dibuix del model de motor petit. Dreta; anàlisi de l'estructura mitjançant el programa FEMM.....	106

## 16.2. Índex de taules

Taula 1. Configuracions típiques de l'HRM. ....	43
Taula 2. Característiques del model 1 de partida .....	49
Taula 3. Característiques del model 2 de partida .....	51
Taula 4. Gràfics de Flux Corrent on es veu la diferència que adopta el pendent en cada un dels dos models assajats.....	54
Taula 5. Característiques de la primera variant del model 1 de motor .....	55
Taula 6. Característiques de la primera variant del model 2 .....	58
Taula 7. Gràfics de la forma d'ona de parell que adopta segons el model 1 o el model 2. ....	61
Taula 8. Gràfics de la relació flux-angle de posició en funció del corrent que adopta segons el model 1 o el model 2. ....	61
Taula 9. Gràfics de la relació flux-corrent de posició en funció de la posició del rotor segons el model 1 o el model 2.....	62



Taula 10. Característiques de la segona variant del model 1 de motor.....	63
Taula 11. Comparativa entre les variants 1 i 2 del model 1 on s'ha reforçat l'estructura interna de l'estator. ....	65
Taula 12. Comparativa entre les variants 1 i 2 del model 2, on s'observa l'acostament dels imants cap als pols del rotor, i la nova forma que adopta l'àrea dedicada a les espirals de les bobines del rotor.....	67
Taula 13. Característiques de la segona variant del model 2 de motor.....	67
Taula 14. Gràfics de la forma d'ona de parell que adopta la primera versió (esquerra) i la segona versió (dreta). ....	70
Taula 15. Gràfics de la forma d'ona de parell que adopta segons el model 1 o el model 2. ....	71
Taula 16. Gràfics de la relació flux-corrent de posició en funció de la posició del rotor segons el model 1 o el model 2.....	71
Taula 17. Característiques de la tercera variant del model 1 amb major profunditat .....	73
Taula 18. Gràfics de la forma d'ona de parell que adopta segons el model 1 o el model 2. ....	75
Taula 19. Gràfics de la relació flux-angle de posició en funció del corrent que adopta segons les versions segona (esquerra) i tercera (dreta) del Model 1.....	75
Taula 20. Gràfics de la relació flux-corrent de posició en funció de la posició del rotor segons la segona variant (esquerra) o la tercera variant (dreta) del Model 1. ....	76
Taula 21. Relació entre angles de dispar, parell i rendiment per a una velocitat del motor de <b>120 min – 1</b> .....	86
Taula 22. Característiques del prototip de motor amb un diàmetre de la meitat de l'original	105
Taula 23. Pressupost per a la realització del projecte del treball. ....	122

### 16.3. Índex de gràfiques

Gràfica 1. Model 1: Representació del parell segons l'angle de posició del rotor i per a cada corrent determinat a l'ANNEX B.....	50
Gràfica 2. Model 1: Representació del flux segons l'angle de posició del rotor i per a cada corrent determinat a l'ANNEX B.....	50

Gràfica	3.	Model	1:	Representació	del	flux	segons el corrent i per a cada angle determinat a l'ANNEX B .....	51	
Gràfica	4.	Model	2:	Representació	del	parell	segons l'angle de posició del rotor i per a cada corrent determinat a l'ANNEX B.....	52	
Gràfica	5.	Model	2:	Representació	del	flux	segons l'angle de posició del rotor i per a cada corrent determinat a l'ANNEX B.....	53	
Gràfica	6.	Model	2:	Representació	del	flux	segons el corrent i per a cada angle determinat a l'ANNEX B .....	53	
Gràfica	7.	Primera variant	model	1:	Representació	del	parell	segons l'angle de posició del rotor i per a cada corrent determinat a l'ANNEX B.....	56
Gràfica	8.	Primera variant	model	1:	Representació	del	flux	segons l'angle de posició del rotor i per a cada corrent determinat a l'ANNEX B.....	57
Gràfica	9.	Primera variant	model	1:	Representació	del	flux	segons el corrent i per a cada angle determinat a l'ANNEX B .....	57
Gràfica	10.	Primera variant	Model	2:	Representació	del	parell	segons l'angle de posició del rotor i per a cada corrent determinat a l'ANNEX B.....	59
Gràfica	11.	Primera variant	Model	2:	Representació	del	flux	segons l'angle de posició del rotor i per a cada corrent determinat a l'ANNEX B.....	60
Gràfica	12.	Primera variant	Model	2:	Representació	del	flux	segons el corrent i per a cada angle determinat a l'ANNEX B .....	60
Gràfica	13.	Segona variant	Model	1:	Representació	del	parell	segons l'angle de posició del rotor i per a cada corrent determinat a l'ANNEX B.....	64
Gràfica	14.	Segona variant	Model	1:	Representació	del	flux	segons l'angle de posició del rotor i per a cada corrent determinat a l'ANNEX B.....	64
Gràfica	15.	Segona variant	Model	1:	Representació	del	flux	segons el corrent i per a cada angle determinat a l'ANNEX B .....	65
Gràfica	16.	Segona variant	Model	2:	Representació	del	parell	segons l'angle de posició del rotor i per a cada corrent determinat a l'ANNEX B.....	68

Gràfica 17. Segona variant Model 2: Representació del flux segons l'angle de posició del rotor i per a cada corrent determinat a l'ANNEX B.....	69
Gràfica 18. Segona variant Model 1: Representació del flux segons el corrent i per a cada angle determinat a l'ANNEX B .....	69
Gràfica 19. Tercera variant del Model 1: Representació del parell segons l'angle de posició del rotor i per a cada corrent determinat a l'ANNEX B.....	74
Gràfica 20. Tercera variant del Model 2: Representació del flux segons l'angle de posició del rotor i per a cada corrent determinat a l'ANNEX B.....	74
Gràfica 21. Corbes de parell – velocitat per a diferents angles de dispar en un rang de velocitats de 60 a 400 <b>min</b> – 1pel motor de gruix 50 mm. ....	87
Gràfica 22. Corbes de rendiment per als diferents angles de dispar en un rang de velocitats de 60 a 400 <b>min</b> – 1pel motor de gruix 50 mm. ....	88
Gràfica 23. Corbes de parell – velocitat per a diferents angles de dispar en un rang de velocitats de 60 a 400 <b>min</b> – 1pel motor de gruix 70 mm. ....	89
Gràfica 24. Corbes parell - velocitat de les dues possibles amplades del motor (depth 50 mm i depth 70 mm) en els diferents angles de dispar analitzats. ....	89
Gràfica 25. Corbes rendiment de les dues possibles amplades del motor (depth 50 mm i depth 70 mm) en els diferents angles de dispar analitzats. ....	90
Gràfica 26. Representació del parell en funció de la velocitat del motor.....	95
Gràfica 27. Representació del corrent retornat en funció de la velocitat del motor .....	96
Gràfica 28. Gràfic del rendiment del motor en funció de la seva velocitat de gir .....	97
Gràfica 29. Representació del parell en funció de la velocitat del motor.....	98
Gràfica 30. Representació del corrent retornat en funció de la velocitat del motor .....	99
Gràfica 31. Gràfic del rendiment del motor en funció de la seva velocitat de gir .....	99
Gràfica 32. Representació del parell en funció de la velocitat del motor.....	100
Gràfica 33. Representació del corrent retornat en funció de la velocitat del motor .....	101
Gràfica 34. Gràfic del rendiment del motor en funció de la seva velocitat de gir .....	101

Gràfica 35.	Representació del parell segons l'angle de posició del rotor i per a cada corrent determinat a l'ANNEX B.....	106
Gràfica 36.	Representació del flux segons l'angle de posició del rotor i per a cada corrent determinat a l'ANNEX B.....	107
Gràfica 37.	Representació del flux segons el corrent i per a cada angle determinat a l'ANNEX B.....	108
Gràfica 38.	Representació del parell en funció de la velocitat del motor.....	110
Gràfica 39.	Representació del parell en funció de la velocitat del motor.....	110
Gràfica 40.	Representació les corbes de parell en funció de la velocitat per als dos models de motor que es volen comparar.....	111
Gràfica 41.	Representació les corbes d'eficiència en funció de la velocitat per als dos models de motor que es volen comparar.....	111
Gràfica 42.	Representació del parell en funció de la velocitat del motor.....	112
Gràfica 43.	Representació del corrent en funció de la velocitat del motor.....	112
Gràfica 44.	Representació del rendiment en funció de la velocitat del motor.....	113
Gràfica 45.	Comparació de les corbes de parell en funció de la velocitat de gir del motor funcionant en mode generador. ....	114
Gràfica 46.	Comparació de les corbes de corrent en funció de la velocitat de gir del motor funcionant en mode generador. ....	114
Gràfica 47.	Comparació de les corbes d'eficiència en funció de la velocitat de gir del motor funcionant en mode generador. ....	115

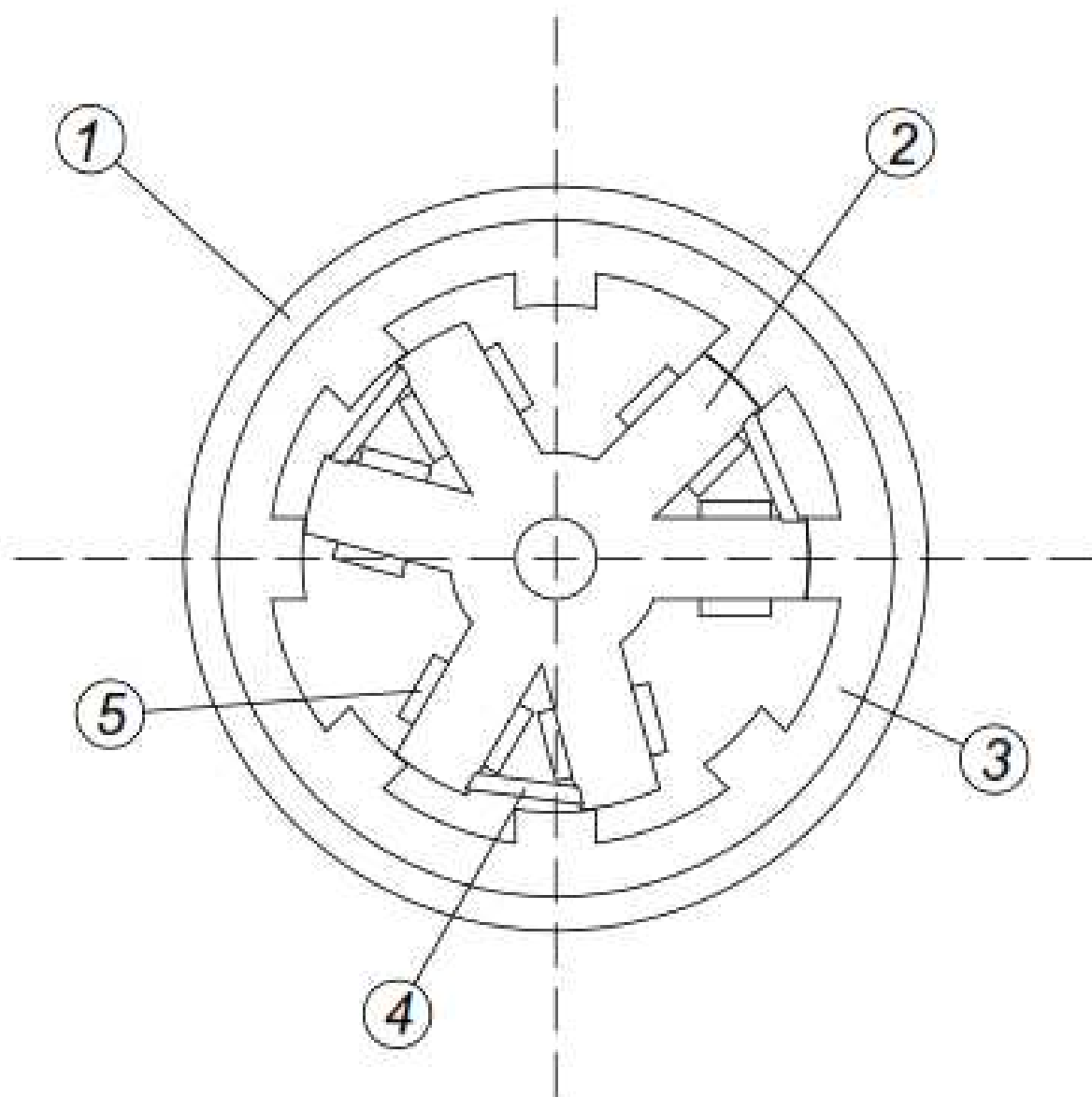
## **17. Plànols de la proposta de motor definitiva**


**17.1. Conjunt motor HRM per a roda de 26''**

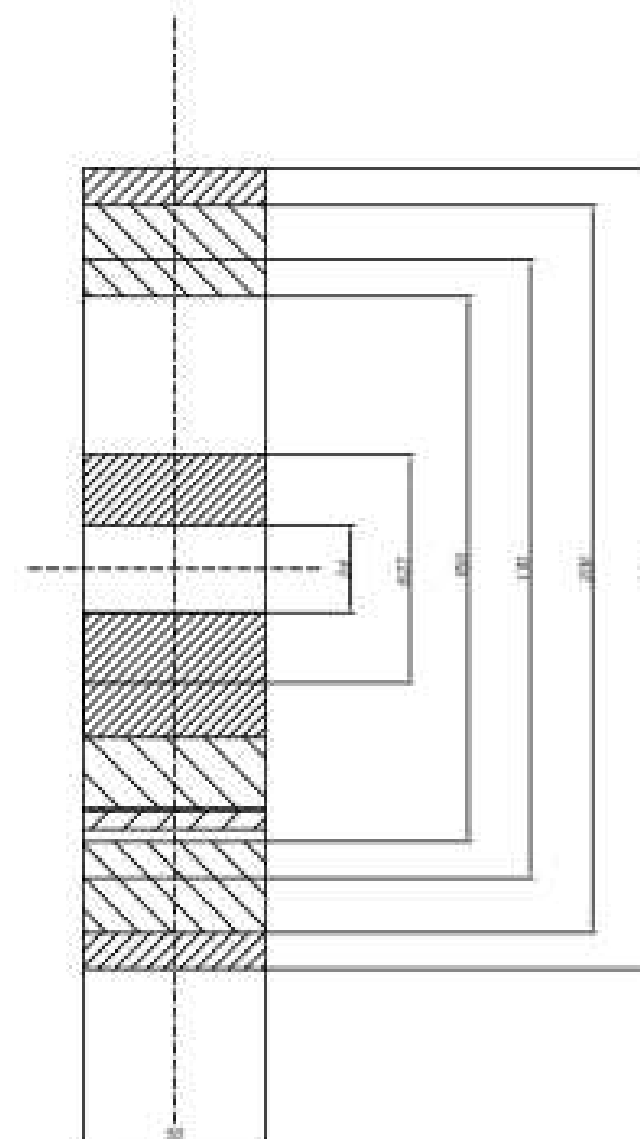
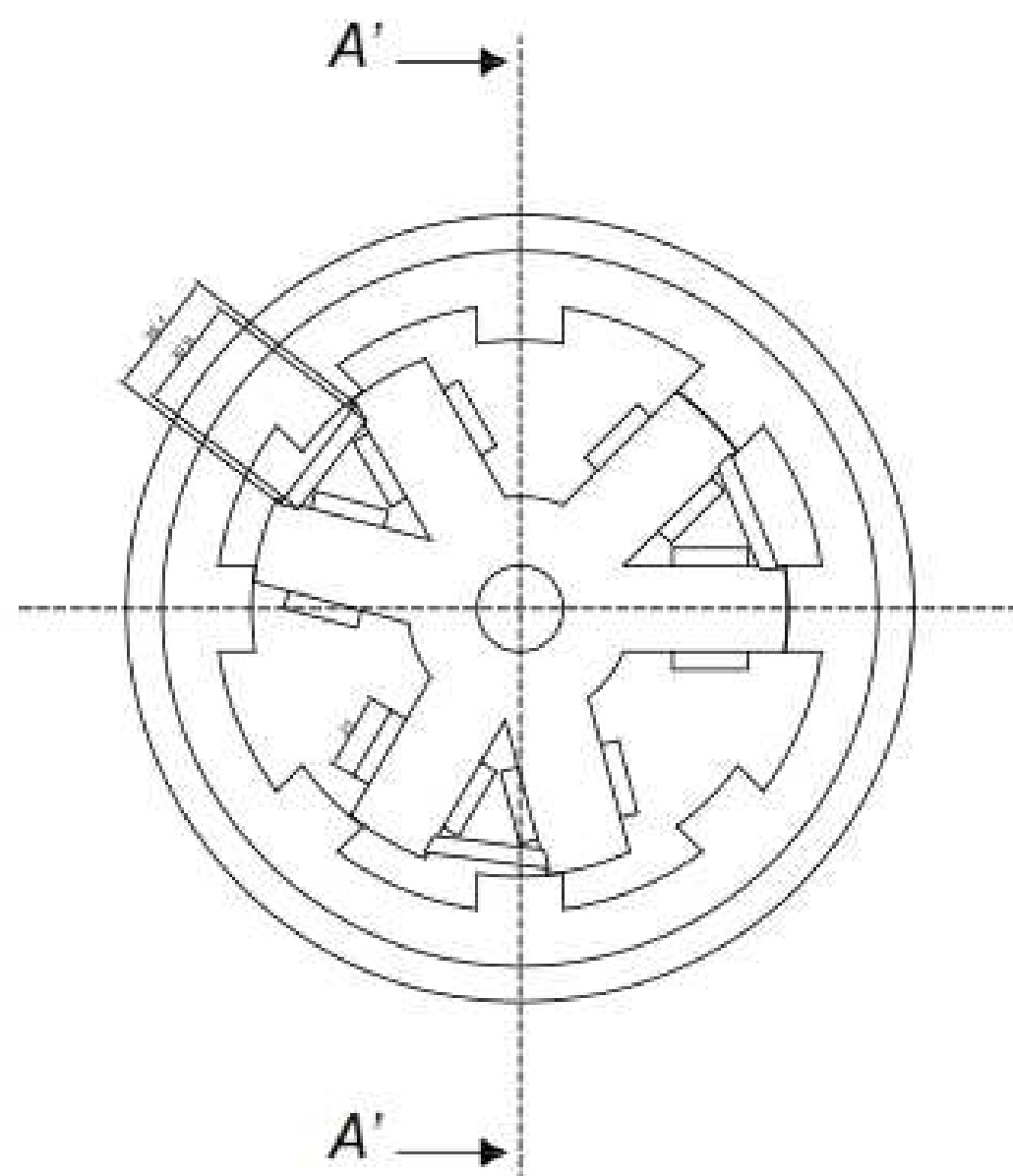
**17.2. Motor HRM per a roda de 26''**



**17.3. Estator de l'HRM per a roda de 26''**

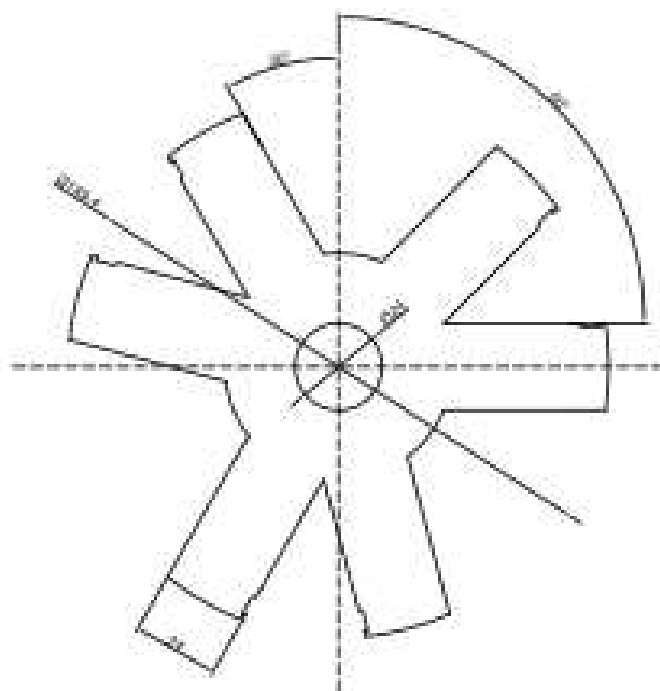
**17.4. Rotor de l'HRM per a roda de 26''**


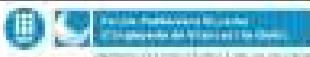


5	6	Bobina	—	—	—
4	3	Imàn	—	—	—
3	1	Ròtor roda de 26"	150527/2	—	—
2	1	Estàtor roda de 26"	150527/1	—	—
1	1	Carcassa exterior	—	—	Alumini
Número:	Quantitat:	Denominació:	Nº plànol:	Norma:	Material:
	1:2	Acabats: —	Tutor: Balduí Blanque Molina		
		Tractament: —	Equip: e-bike sostenible		
Material: —		Projecte: Estudi motor e-bike sostenible			
Producte: —		Especificacions: Plànol de conjunt			
Plànol Nº: 150527		Denominació: Conjunt motor HRM per a roda de 26"		 <div data-bbox="1225 2078 1434 2125">Inici de l'assignatura de la carrera d'Enginyeria de Vehicles el·líctrics</div>	

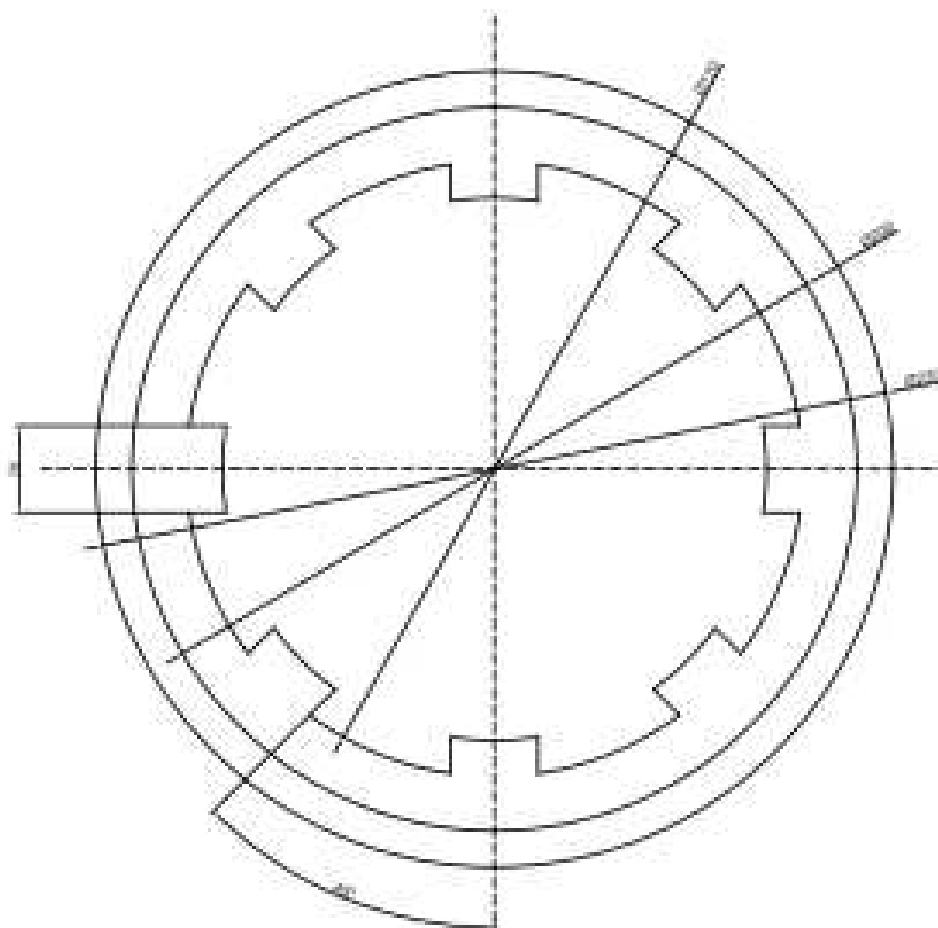




	Acabats: -	Tutor: Baldor Blanque Molins
	Tractament: -	Equip: Projectistes a-bike
	Material: -	Projecte: Estudi motor a-bike sostenible
Escala: 1:2	Producte: -	Especificacions: Plànol de dades generals
Plano Nº: 150527	Denominació:  <i>Motor HRM per a roda de 26"</i>	
		



	Acabats: --	Tutor: Baldi Blanque Molina
	Tractament: --	Equip: e-bike sostenible
Escala: 1:2	Material: --	Projecte: Estudi motor e-bike sostenible
	Producte: --	Especificacions: --
Plano Nº: 150527/1	Denominación: <b>Estàtor de l'HRM per a roda de 26"</b>	
		





	Acabats: —	Tutor: Bàrbar Blangues Molins
	Tractament: —	Equip: e-bike autèntic
Escala: 1:2	Material: —	Projecte: Explotador e-bike autèntic
	Producte: —	Especificacions: —
Plano N°: 150527/2	Denominació:  Estàtor de l'HRM per a roda de 26"	
		

# ANNEXES

## **ANNEX A. Normativa: UNE-EN 15194:2009+A1:2012; Cicles. Cicles amb assistència elèctrica. Bicycles EPAC.**

S'han destacat els punts de la normativa que afecten de forma més directe al contingut d'aquest projecte ja que han marcat limitacions i directrius a seguir de forma rigorosa. Es citen tal qual estan incloses al text al qual es fa referència:

### **1.- OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN**

Esta norma europea se aplica a ciclos con asistencia eléctrica de una potencia nominal continua máxima de 0,25 kW, cuya alimentación se reduce progresivamente y finalmente se corta cuando el vehículo alcanza una velocidad de 25 km/h, o antes, si el ciclista para de pedalear.

Esta norma europea especifica los requisitos de seguridad y métodos de ensayo relativos a la evaluación del diseño y del montaje de las bicicletas de asistencia eléctrica y de los subconjuntos para sistemas que utilizan una tensión de hasta 48 VCC o integrado a un cargador de batería con una entrada de 230 V.

Esta norma europea especifica los requisitos y los métodos de ensayo relativos a los sistemas de gestión de la potencia del motor, a los circuitos eléctricos incluyendo el sistema de carga para evaluar el diseño y el montaje de ciclos con asistencia eléctrica y subconjuntos para sistemas que tengan una tensión de hasta e incluyendo 48 VCC o integrando un cargador con una entrada de 230V.

#### **4.2.4 Gestión de la potencia**

##### **4.2.4.1 Requisitos**

Cuando se ensaye según el método descrito en el apartado 4.2.4.2 los registros deben indicar que:

- a) sólo debe suministrarse asistencia cuando el ciclista pedalee hacia delante. Este requisito tiene que ser comprobado de acuerdo a los métodos de ensayo descritos en el apartado 4.2.4.2.2 a);
- b) la asistencia debe cortarse cuando el ciclista deje de pedalear hacia delante para que la distancia de detención no exceda de 5 m utilizando un interruptor de palanca de freno o bien 2 m sin utilizar un interruptor de palanca de freno. Este requisito tiene que comprobarse de acuerdo con los métodos de ensayo descritos en el apartado 4.2.4.2.2 b);
- c) la potencia suministrada debe reducirse progresivamente (véase el anexo B) y finalmente cortarse cuando el vehículo alcance la velocidad de asistencia máxima indicada por su diseño. Este requisito tiene que comprobarse de acuerdo a los métodos de ensayo descritos en el apartado 4.2.4.2;
- d) la asistencia debe gestionarse de forma suave y progresiva.

#### 4.2.4.3 Modo de asistencia en el arranque

##### 4.2.4.3.1 Requisitos

La EPAC puede estar equipada con un modo de asistencia al arranque hasta una velocidad de diseño de 6 km/h a valores inferiores especificados por el fabricante. Debe evitarse todo uso no autorizado.

Este modo debe ser activado por una acción voluntaria y mantenida del usuario, bien cuando conduzca sin pedalear o cuando empuje la bicicleta.

#### **4.2.6 Velocidad máxima hasta la que el motor eléctrico suministra asistencia**

##### 4.3.6.1 Requisitos

La velocidad máxima a la que el motor eléctrico suministra asistencia puede diferir en un  $\pm 5\%$  de la velocidad indicada en la etiqueta descrita en el capítulo 5 cuando ésta se determina según el método de ensayo descrito en el apartado 4.2.6.2, es decir 25 km/h o un valor inferior especificado por el fabricante.

## ANNEX B. Procediment de realització de la simulació de l'assaig dinàmic del motor.

A continuació s'explica pas a pas quin és el procediment a seguir per a realitzar una simulació del motor tal i com requereix el projecte en diverses ocasions per tal d'obtenir els resultats mostrats, com han estat les corbes de parell velocitat, les corbes d'eficiència, el corrent de retorn en cas del funcionament en mode generador, etc.

En primer lloc destacar que l'essència del software utilitzat aprofita les corbes obtingudes de l'assaig estàtic del motor i que simula el gir del motor durant mig *Stroke* i que permet veure el comportament del motor en cada un dels seus angles de gir, per a una fase i per a diferents intensitats de corrent (de 0 a 15 A).

Per a la construcció del software de simulació dinàmica del motor, s'ha aprofitat part del programa del grup GAECE i que és propietat de Balduí Blanqué, al qual s'hi ha afegit modificacions per tal de simplificar els processos i obtenir la informació de major rellevància de forma clara.

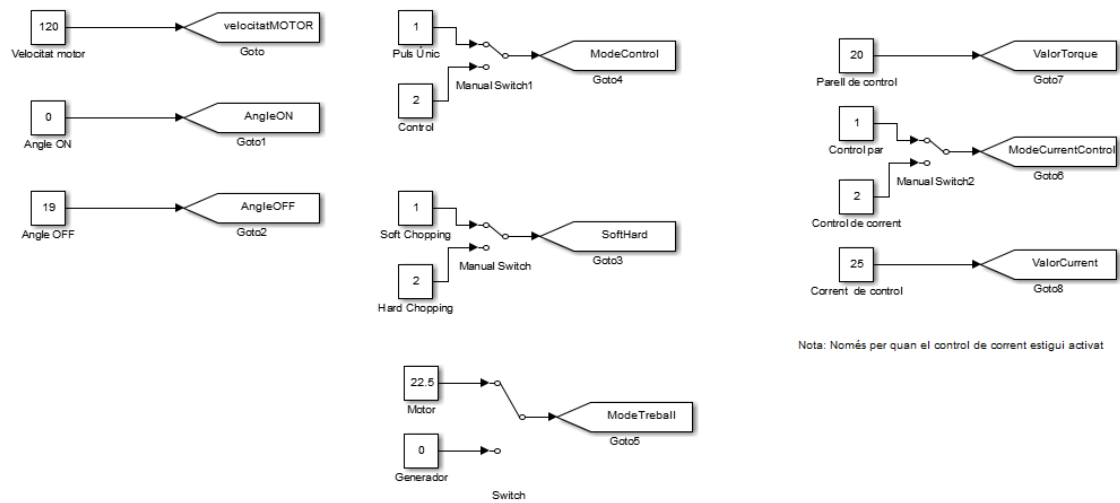
Aquest nou software s'ha creat amb la finalitat d'obtenir els valors mitjos de parell i rendiment, dels diversos motors dissenyats, esbrinar quin és el seu punt de màxim parell en funció dels angles de dispar, i igualment el seu punt de màxima eficiència en funció dels angles de dispar i per descomptat en funció de la seva velocitat de gir.

S'haurà de carregar de forma correcte les dades al programa matlab, i obrir l'arxiu de Simulink '*SimulacioMotor*' per a començar a fer els assajos. S'haurà d'anar amb cura amb els paràmetres físics del motor que puguin canviar com ara la resistència o l'angle de pas.

Un cop les corbes ja estan carregades al sistema de simulació dins l'estructura del motor '*MOTOR A ASSAJAR*' i s'ha fet les correccions abans esmentades es podrà procedir a l'assaig. Per a fer-ho, cal accedir a la pestanya anomenada '*DADES DEL SISTEMA*' i començar a omplir els camps que hi ha.

Es decideix si es vol treballar en mode motor o en mode generador, a quina velocitat es vol que giri el motor, quins són els angles de dispar, quin és el tipus de commutació dels interruptors del controlador del motor, que pot ser de pols únic o mitjançant el control de parell o de corrent, i en cas que sigui així, quins valors de control es vol establir.

### DADES DEL SISTEMA

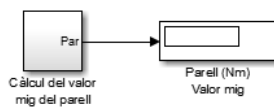


Il·lustració 52. Interior del bloc 'DADES DEL SISTEMA' del programa de la simulació de funcionament del motor realitzat a partir de Matlab Simulink.

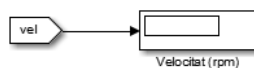
Les dades que s'obtinguin de realitzar les simulacions requerides apareixeran a la pantalla 'VISUALITZACIÓ DE MESURES' i serviran per a tenir consciència dels valors que resulten de l'assaig que s'ha realitzat.

### PARELL I VELOCITAT

#### Valor mig del parell (Nm)

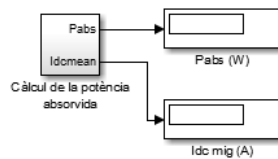


#### Velocitat del motor (rpm)

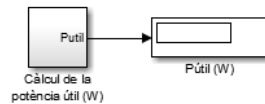


### POTÈNCIA

#### Potència absorbida (W)

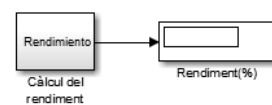


#### Potència útil (W)



### RENDIMENT

#### Rendiment del motor (%)



Il·lustració 53. Interior del bloc 'VISUALITZACIÓ DE MESURES' del programa de la simulació de funcionament del motor realitzat a partir de Matlab Simulink.

Amb les dades obtingudes en les diferents velocitats i per a diferents angles de dispar és com s'han obtingut els gràfics que s'han inclòs en diversos apartats del treball per a poder analitzar el comportament del motor treballant en els seus diferents modes de funcionament i poder fer la comparativa i veure si les millores aplicades donaven bons resultats.